This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

LANE

MEDICAL LIBRARY

SEAL OF THE LELAND STANFORD JUNIOR UNIVERSITY
SEMPER VIRENS
1885

LEVI COOPER LANE FUND

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

Les paragraphes et les chapitres marqués d'un astérisque (*) ne sont pas compris dans le programme d'enseignement des lycées; mais ils le sont dans les programmes des Facultés de médecine et des Facultés des sciences.

Quant aux paragraphes imprimés en petit caractère, les uns, contenant des formules et des problèmes, seront omis par les lecteurs peu familiarisés avec le calcul algébrique; les autres, ne faisant pas partie du programme, et comprenant la *diffusion*, la *dialyse*, l'*occlusion*, la *dissociation*, la *capillarité*, la *vision*, la *polarisation*, le *diamagnatésime*, etc., s'adressent aux lecteurs qui veulent acquérir des connaissances générales sur toutes les branches de la physique.

Les nombres placés au-dessous des dessins, à droite des numéros d'ordre, indiquent, en centimètres, la hauteur des appareils, ou leur longueur dans le sens horizontal, suivant que ces nombres sont précédés des lettres *h* ou *l*.

Tous nos dessins étant originaux et pris, en général, dans notre cabinet de physique, la reproduction en est interdite et sera poursuivie en contrefaçon; il en sera de même, en vertu des traités internationaux, de toute traduction non autorisée par l'auteur.

OUVRAGE DU MÊME AUTEUR.

COURS DE PHYSIQUE

PUREMENT EXPÉRIMENTALE ET SANS MATHÉMATIQUES

A l'usage des gens du monde, des candidats au baccalauréat ès lettres, des écoles normales primaires, des institutrices, des pensions de demoiselles, etc.

Ouvrage de luxe, orné de 385 magnifiques gravures et d'une planche coloriée

CINQUIÈME ÉDITION

Les prix des deux ouvrages ne sont point augmentés et restent :

pour le TRAITÉ DE PHYSIQUE, 16e édition. . . . . 7 fr. »
et pour le COURS DE PHYSIQUE, 5e édition . . . . 5 fr. 50

(Mêmes prix par la poste, en adressant *franco* un mandat de poste de 7 fr. ou de 5 fr. 50 à M. Ganot, 8, rue du Jardinet, à Paris.)

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

EXPÉRIMENTALE ET APPLIQUÉE

ET DE

MÉTÉOROLOGIE

SUIVI D'UN RECUEIL DE 100 PROBLÈMES AVEC SOLUTIONS

Illustré de 621 belles gravures sur bois intercalées dans le texte

ET D'UNE PLANCHE COLORIÉE

A l'usage des Établissements d'instruction, des aspirants aux grades des Facultés et des candidats aux diverses Écoles du Gouvernement

PAR A. GANOT

PROFESSEUR DE MATHÉMATIQUES ET DE PHYSIQUE

SEIZIÈME ÉDITION

AUGMENTÉE DE PLUSIEURS EXPÉRIENCES ET APPAREILS NOUVEAUX : CHRONOSCOPE POUR MESURER LA DURÉE DE L'ÉTINCELLE ELECTRIQUE PAR MM. LUCAS ET CAZIN ; EFFLUVE ÉLECTRIQUE PAR M. DU MONCEL ; MACHINE D'INDUCTION A COURANTS PÉRIPOLAIRES PAR M. LE ROUX ; ÉLECTROMÈTRE BIFILAIRE A CONDUCTEUR MOBILE PAR M. PALMIERI ; THÉORIE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE PAR LE MÊME, ETC.

LANE MEDICAL LIBRARY
7707
SAN FRANCISCO

PARIS

CHEZ L'AUTEUR-ÉDITEUR

8, RUE DU JARDINET

1874

LAME LIBRARY

B21
G19
1874

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

LIVRE I

MATIÈRE, FORCES ET MOUVEMENT

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES

1. **Objet de la physique.** — La *physique* a pour objet l'étude des phénomènes que présentent les corps, en tant que ceux-ci n'éprouvent pas de changement dans leur composition.

La *chimie*, au contraire, traite particulièrement des phénomènes qui modifient plus ou moins la nature des corps.

2. **Matière.** — On nomme *matière* ou *substance* tout ce qui tombe immédiatement sous nos sens.

Toute substance dont l'analyse chimique n'extrait qu'une seule espèce de matière est élémentaire, ou *simple*. Le nombre des substances simples connues aujourd'hui est de soixante-six : mais il est probable que plusieurs sont composées.

3. **Corps, atomes, molécules.**— Toute quantité de matière limitée est un *corps*. Les propriétés des corps font voir qu'ils ne sont point formés d'une matière continue, mais d'éléments, pour ainsi dire infiniment petits, qui ne peuvent être divisés physiquement. et sont simplement juxtaposés sans se toucher, étant maintenus à distance par des attractions et des répulsions réciproques qu'on désigne sous le nom de *forces moléculaires*. On sait que l'action répulsive est due à la chaleur ; quant à l'action attractive, qu'on désigne sous les noms de *cohésion*, d'*affinité*, la cause en est inconnue, et on l'admet seulement comme un fait.

Les éléments des corps se nomment *atomes*. Un groupe d'atomes forme une *molécule*, et les molécules, en s'unissant entre elles, constituent les corps. En chimie, atome est souvent synonyme de molécule ; c'est-à-dire que l'atome chimique est composé.

On ignore la constitution intime des corps, ne connaissant ni la forme ni le volume des atomes et des molécules, ni la distance qui les sépare, ni les lois des forces qui les régissent. On a seulement une limite approximative du nombre des molécules contenues dans un espace donné. En effet, A. Dupré, à Rennes, dans ses importantes recherches sur la désagrégation totale et sur les forces de réunion, est arrivé à ce résultat que, *dans un cube d'eau ayant pour côté 1 millième de millimètre, il entre plus de deux cent vingt-cinq mille millions de molécules.* (*Théorie mécanique de la chaleur,* par Athanase Dupré, page 404.) Dans un travail inédit sur les attractions au contact, le même savant a obtenu une limite 15 fois plus élevée.

De son côté, M. Dumas, dans des recherches expérimentales sur les ferments, a trouvé récemment que 1 millimètre cube de bière contient 2 772 000 cellules, et que pour décomposer 1 centigramme de sucre de raisin et produire 5 milligrammes d'alcool environ, il faut 20 ou 30 milliards de cellules. Si l'on observe que la cellule est elle-même composée d'un nombre considérable de molécules, on voit que les nombres de M. Dumas sont de même ordre que ceux de Dupré, et les confirment. (*Académie des Sciences* du 5 août 1872.)

4. **Masse.** — En physique, on entend par *masse* d'un corps la quantité de matière qu'il contient. En mécanique, cette définition est insuffisante, comme on le verra ci-après (36).

5. **États des corps.** — On distingue trois états des corps :

1° L'*état solide,* qui s'observe, aux températures ordinaires, dans les bois, les pierres, les métaux. Cet état est caractérisé par une cohésion telle entre les molécules, qu'on ne peut les séparer que par un effort plus ou moins considérable. C'est en vertu de cette cohésion que les corps solides possèdent une dureté plus ou moins grande, et conservent par eux-mêmes la forme que la nature ou l'art leur a donnée.

2° L'*état liquide,* que présentent l'eau, l'alcool, les huiles. Le caractère distinctif des liquides est une cohésion si faible entre leurs molécules, qu'elles sont extrêmement mobiles les unes par rapport aux autres; d'où il résulte que ces corps ne présentent aucune dureté, et n'affectent aucune forme particulière, mais prennent toujours celle des vases qui les contiennent.

3° L'*état gazeux,* qu'on observe dans l'air et dans un grand nombre d'autres corps qu'on nomme *gaz* ou *fluides aériformes.* Dans les gaz, la mobilité des molécules est encore plus grande que dans les liquides; mais leur caractère distinctif est surtout une tendance à prendre sans cesse un volume plus grand, pro-

priété qu'on désigne sous le nom d'*expansibilité*, et qui sera constatée bientôt par l'expérience (131).

Les liquides et les gaz se désignent sous le nom général de *fluides*.

La plupart des corps simples et beaucoup de corps composés peuvent successivement se présenter à l'état solide, liquide ou gazeux, suivant les variations de température. L'eau nous en offre un exemple bien connu.

C'est du rapport entre les attractions et les répulsions moléculaires (3) que dépendent les trois états des corps.

6. **Phénomènes physiques.** — Tout fait qui s'accomplit sur la matière, sans altération de composition, est un *phénomène physique*. Un corps qui tombe, un son qui se produit, de l'eau qui se congèle, sont des phénomènes.

7. **Lois et théories physiques.** — On nomme *loi physique* la relation constante qui existe entre un phénomène et sa cause. Par exemple, on démontre qu'un volume donné de gaz devient deux, trois fois moindre, lorsqu'il supporte une pression deux, trois fois plus grande : c'est là une loi physique qu'on exprime en disant que *les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions*.

Une *théorie physique* est l'ensemble des lois qui se rapportent à une même classe de phénomènes. C'est ainsi qu'on dit : la *théorie de la lumière*, la *théorie de l'électricité*. Cependant cette dénomination s'applique aussi, dans un sens plus restreint, à l'explication de certains phénomènes particuliers. Par exemple, lorsqu'on dit : la *théorie de la rosée*, la *théorie du mirage*.

8. **Agents physiques, éther, théorie dynamique.**— Comme cause des phénomènes qu'offrent les corps, on admet l'existence d'*agents physiques* ou de *forces naturelles* qui régissent la matière.

Ces agents sont : l'*attraction*, la *chaleur*, la *lumière*, le *magnétisme* et l'*électricité*.

Les agents physiques ne se manifestant à nous que par leurs effets, leur nature nous est complétement inconnue. Sont-ce des propriétés inhérentes à la matière, ou des matières subtiles, impalpables, répandues dans tout l'univers, et dont les effets sont le résultat de mouvements particuliers imprimés à leur masse? Cette dernière hypothèse a d'abord régné seule dans la science, et, sous le nom de *fluides impondérables*, on a longtemps admis plusieurs fluides spéciaux : un pour la chaleur, un autre pour la lumière ; deux pour le magnétisme, et deux pour l'électricité.

Cette théorie compliquée des fluides impondérables disparaît de jour en jour. On lui substitue aujourd'hui une double hypothèse : 1° celle d'un fluide unique, l'*éther*, éminemment élastique, répandu non-seulement dans tout l'univers, *mais* pénétrant la masse

de tous les corps; 2° l'hypothèse d'un mouvement propre des molécules de la matière, lequel varie de forme et de vitesse, et se transmet à l'éther : tel mouvement d'une nature déterminée constitue la chaleur; tel mouvement plus rapide, la lumière; tel autre, différent de forme ou de caractère, le magnétisme et l'électricité.

Dans cette théorie, qu'on désigne sous le nom de *théorie dynamique*, non-seulement les atomes des corps transmettent le mouvement aux atomes de l'éther, mais ceux-ci le communiquent aux premiers, en sorte que les atomes des corps et de l'éther sont successivement des sources et des récipients de mouvement. Tous les phénomènes physiques, rapportés ainsi à une cause mécanique unique, ne sont donc que des transformations de mouvement.

De cette manière nouvelle d'envisager les phénomènes est découlée une hypothèse grandiose, celle de la *corrélation* et de l'*unité des forces physiques*. En effet, à mesure qu'on avance dans l'étude des phénomènes physiques, on voit non-seulement le mouvement se transformer en chaleur, et la chaleur en mouvement, mais la chaleur engendrer la lumière et l'électricité, et cette dernière force produire la chaleur, la lumière, le magnétisme et le mouvement.

9. **Divisions de la physique.**— L'étude de la physique présente quatre grandes divisions :

1° Les propriétés générales de la matière, comprenant l'*attraction universelle*, l'*hydrostatique*, la *pneumatique* et l'*acoustique*, qui traite des vibrations des corps élastiques; 2° la *chaleur*; 3° la *lumière*; 4° l'*électricité* et le *magnétisme*.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS

10. **Diverses sortes de propriétés.**— On distingue, dans les corps, des *propriétés générales* et des *propriétés particulières*. Les premières sont celles qui conviennent à tous les corps, sous quelque état qu'on les considère. Celles qu'il importe de connaître dès à présent sont : l'*étendue*, la *divisibilité*, la *porosité*, la *compressibilité*, l'*élasticité*, la *mobilité* et l'*inertie*.

Les propriétés particulières sont celles qu'on n'observe que dans certains corps ou dans certains états des corps; telles sont : la *solidité*, la *fluidité*, la *ténacité*, la *ductilité*, la *malléabilité*, la *dureté*, la *transparence*, la *coloration*, etc.

11. Étendue. — L'*étendue* est la propriété qu'a tout corps d'occuper une portion limitée de l'espace.

Un grand nombre d'instruments ont été construits pour mesurer l'étendue. Nous ferons connaître ici le vernier, la vis micrométrique et le cathétomètre.

12. Vernier. — Le *vernier* tire son nom de celui de son inventeur, mathématicien français mort en 1637. Cet instrument fait partie de plusieurs appareils de physique, comme les baromètres, les cathétomètres. Il est formé de deux règles : la plus grande,

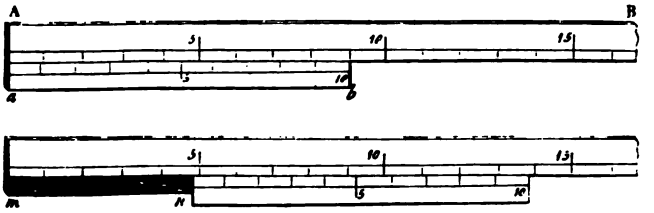


Fig. 1.

AB (fig. 1), est fixe et divisée en parties égales; la plus petite, *ab*, est mobile; c'est elle qui est proprement le vernier. Pour la graduer, on lui donne une longueur égale à 9 des divisions de la grande règle, puis on la divise en 10 parties égales. Il en résulte que chaque division de la règle *ab* est d'un dixième plus petite que celles de la règle AB.

Pour mesurer avec le vernier la longueur d'un objet *mn*, on place celui-ci, comme on le voit dans la figure, le long de la grande règle, et l'on trouve ainsi que cet objet a, par exemple, une longueur égale à 4 unités plus une fraction. C'est cette fraction que le vernier va servir à évaluer. Pour cela, on le fait glisser sur la règle fixe jusqu'à ce qu'il vienne se placer à l'extrémité de l'objet *mn*, puis on cherche où se fait sensiblement la coïncidence entre les divisions des deux règles. Dans la figure, elle a lieu à la huitième division du vernier, à partir du point *n*. Cela indique que la fraction à mesurer est égale à 8 dixièmes. En effet, les divisions du vernier étant plus petites d'un dixième que celles de la règle, on voit qu'à partir du point de coïncidence, en allant de droite à gauche, elles sont successivement en retard, sur celles de la règle, de 1, de 2, de 3... dixièmes. De l'extrémité *n* du vernier à la quatrième division de la règle, il y a donc 8 dixièmes; d'où *mn* égale 4 des divisions de AB, plus 8 dixièmes. Par conséquent, si les divisions de la grande règle sont des millimètres, on aura la longueur de *mn* à un dixième de millimètre près. Pour l'obtenir à un

vingtième, à un trentième de millimètre, il faudrait diviser AB en millimètres, en porter 19 ou 29 sur le vernier, puis diviser celui-ci en 20 ou 30 parties égales. Mais pour distinguer alors où se ferait la coïncidence, il faudrait faire usage d'une loupe. Dans la mesure des arcs, on fait aussi usage du vernier pour évaluer en minutes et en secondes les fractions de degré.

13. **Vis micrométrique.** — On nomme *vis micrométrique* toute vis qu'on emploie pour mesurer avec précision de petites longueurs ou de petites épaisseurs. Lorsqu'une vis est bien exécutée, son *pas*, c'est-à-dire l'intervalle entre deux filets consécutifs, doit être partout le même; d'où il résulte que si la vis tourne dans un écrou fixe, elle avance, à chaque tour, d'une longueur égale à celle du pas, et que pour une faction de tour, $\frac{1}{10}$ par exemple, elle n'avance que de $\frac{1}{10}$ du pas. Par conséquent, si le pas est d'un millimètre, et si, à l'extrémité de la vis, est un cercle gradué en 360 degrés, et tournant avec elle, en ne faisant marcher ce cercle que d'une division, on fera avancer la vis de $\frac{1}{360}$ de millimètre. On a donc là un moyen de mesurer avec une grande précision des longueurs ou des épaisseurs très-faibles.

* 14. **Cathétomètre.** — Cet instrument sert à mesurer, dans le sens de la verticale, la distance de deux points donnés; par exemple, la différence de hauteur de deux colonnes liquides. Réduit à sa plus simple expression, il consiste en une tige verticale le long de laquelle glisse une lunette horizontale, qui, par sa course entre deux points, en fait connaître la distance verticale. La figure 2 donne une vue d'ensemble du cathétomètre, et les figures 3 et 4 en donnent les détails sur une plus grande échelle.

Une colonne d'acier de $1^m,20$ de hauteur, montée sur un trépied à vis calantes, porte le *corps* du cathétomètre. On nomme ainsi un tube creux de laiton PQ, qui s'engage comme un manchon sur la colonne d'acier, et tourne librement autour. Pour cela, le tube PQ est surmonté d'un chapeau de cuivre z, représenté plus en grand sur la droite de la figure 2. La tête du chapeau est traversée par une vis x. La pointe de celle-ci portant sur l'extrémité axiale de la colonne, lorsqu'on tourne la vis, on soulève tout le tube PQ, qui se trouve ainsi suspendu sur pivot, guidé à sa partie inférieure par un collier qui embrasse un tourillon conique réservé à la base de la colonne.

Le long du tube PQ glissent deux chariots AB et DC reliés entre eux par une vis de rappel t. Le premier porte une lunette LL′ et un niveau à bulle d'air mn (94), montés sur une fourchette mobile autour d'un axe c fixé sur le corps du cathétomètre. A la fourchette est fixé un levier i qu'on incline plus ou moins à l'aide d'une vis de rappel p, pour obtenir l'horizontalité du niveau et de la lunette.

Le bouton K, qui fait marcher la vis t, porte sur sa circonférence une division en 100 parties, et un repère o, fixé à la pièce DC, marque de combien de divisions on tourne le bouton K. Le pas de la vis t étant de $\frac{1}{2}$ millimètre, il s'ensuit que lorsqu'on tourne le bouton K de 1 division, le chariot AB et la lunette se déplacent de $\frac{1}{200}$ de millimètre. Enfin, sur toute la longueur du tube PQ est une échelle en millimètres représentée sur la droite de la figure 4, et un vernier vv', lié au chariot AB, glisse le long de l'échelle.

Ces détails connus, pour déterminer la position d'un point, on abaisse ou élève les deux chariots et avec eux la lunette, jusqu'à ce que celle-ci soit à la hauteur

du point à observer; puis, fixant le chariot DC au moyen d'une vis de pression *d*, on tourne lentement le bouton K jusqu'à ce que le point de croisement de deux fils fins, qui sont dans la lunette et sur son axe optique (572), corresponde exactement au point que l'on vise. Si on lit alors l'indication du vernier

Fig. 2.

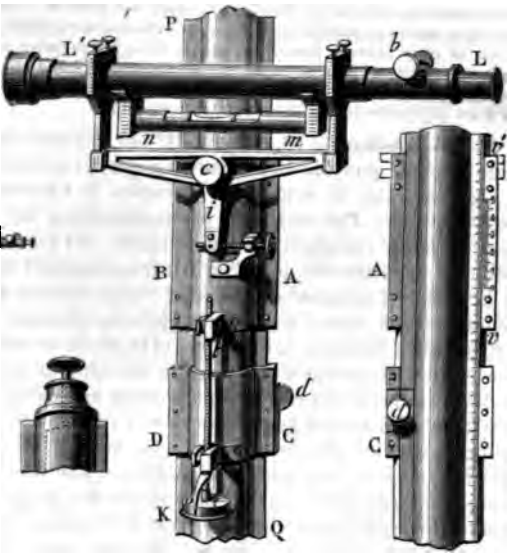


Fig. 3. Fig. 4.

sur l'échelle, on a un nombre qui marque, au-dessus du zéro de celle-ci, la hauteur du point observé. Opérant de la même manière pour déterminer la hauteur du second point donné, la différence entre les deux nombres obtenus fait connaître, dans le sens de la verticale, la distance des deux points.

Pour donner des indications précises, le cathétomètre doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° *L'axe optique de la lunette doit être parallèle à la ligne du niveau.* Cette condition, qui est remplie d'avance par le constructeur, s'obtient à l'aide de vis de rappel dont le niveau est muni.

2° *L'axe optique de la lunette doit être perpendiculaire à l'axe de rotation.* Pour cela, notant la position de la bulle du niveau par rapport à ses repères, on tourne la lunette et le niveau de 180 degrés. Si la bulle revient exactement à la même distance de ses repères, et à la même position par rapport à l'observa-

teur, le niveau s'est placé dans une position parallèle à la première, ce qui indique que la rotation s'est opérée perpendiculairement à l'axe. Si la bulle n'est pas revenue à la même place, on fait marcher la vis *p* jusqu'à ce que, dans deux positions diamétralement opposées, la bulle revienne à la même place par rapport à l'observateur; la lunette est alors perpendiculaire à l'axe.

3° *L'axe de rotation de l'instrument doit être vertical.* Pour cela le niveau *mn* étant amené parallèlement à l'une des branches du trépied, on fait marcher la vis de cette branche jusqu'à ce que la bulle arrive entre ses repères. Tournant ensuite de 90 degrés, on amène de nouveau la bulle entre ses repères au moyen des deux autres vis calantes. L'axe de l'instrument est alors vertical, puisqu'il est perpendiculaire à deux droites horizontales.

15. **Divisibilité.** — La *divisibilité* est la propriété que possède tout corps de pouvoir être séparé en parties distinctes.

On peut citer de nombreux exemples de l'extrême divisibilité de la matière. Par exemple, 5 centigrammes de musc suffisent pour répandre, pendant plusieurs années, des particules odorantes dans un appartement dont l'air est fréquemment renouvelé.

Le sang est composé de globules rouges flottant dans un liquide nommé *sérum*. Chez l'homme, ces globules, qui sont sphériques, ont un diamètre de $\frac{1}{150}$ de millimètre, et la goutte de sang qui peut être suspendue à la pointe d'une aiguille, en contient près d'un million.

La divisibilité des corps étant poussée assez loin pour que leurs particules échappent au toucher et à la vue, même avec l'aide des microscopes les plus grossissants, on ne peut constater par l'expérience si la divisibilité de la matière a une limite ou si elle est indéfinie. Cependant, d'après la stabilité des propriétés chimiques particulières à chaque corps, et d'après l'invariabilité des rapports qui existent entre les poids des éléments qui se combinent, on admet qu'il y a une limite à la divisibilité. C'est pour cela qu'on regarde les corps comme formés d'éléments matériels qui ne sont pas susceptibles d'être divisés, et qu'on appelle *atomes*, c'est-à-dire insécables (3).

16. **Porosité.** — La contraction de volume que subissent tous les corps par la compression et par le refroidissement prouve que leurs molécules ne se touchent pas, mais qu'il existe entre elles des interstices auxquels on a donné le nom de *pores*. C'est cette propriété générale de la matière de posséder des pores qu'on désigne sous le nom de *porosité*.

On distingue deux espèces de pores : les *pores physiques* ou *intermoléculaires*, interstices assez petits pour que les forces moléculaires attractives ou répulsives conservent leur action, et les *pores sensibles*, véritables trous ou lacunes au delà desquelles les forces moléculaires n'ont plus d'action. C'est aux pores physiques que sont dues les contractions et les dilatations qui proviennent des variations de température. Ce sont les pores sensibles qui,

dans les êtres organisés, sont le siége des phénomènes d'exhalation et d'absorption.

Les pores sensibles sont apparents dans les éponges, le bois, la pierre ponce. Les pores physiques ne le sont dans aucun cas. Cependant, tous les corps diminuant de volume par le refroidissement et par la compression, on en conclut que tous ont des pores physiques.

Fig. 5.

Pour montrer expérimentalement les pores sensibles, on prend un long tube de verre A (fig. 5), terminé à sa partie supérieure par un godet de cuivre *m*, et à sa partie inférieure par un pied de même métal qui peut se visser sur la *platine* P d'une machine à faire le vide. Le fond du godet *m* est formé d'un cuir épais de buffle *o*. On y verse du mercure de manière à recouvrir entièrement le cuir, puis on fait le vide dans le tube. Aussitôt, par l'effet de la pression atmosphérique qui pèse sur le mercure, ce liquide passe à travers les pores du cuir et tombe dans le tube sous forme d'une pluie fine. On fait passer de la même manière de l'eau à travers les pores du bois, lorsqu'on substitue au cuir ci-dessus un disque de bois coupé perpendiculairement aux fibres.

La porosité des métaux a été démontrée par l'expérience suivante, due aux académiciens de Florence, en 1661. Cherchant à constater si l'eau pouvait diminuer de volume par l'effet d'une forte pression, ils prirent une petite sphère d'argent creuse, la remplirent d'eau, et après avoir ferme hermétiquement la sphère en en soudant l'orifice, ils la frappèrent à coups de marteau pour en réduire le volume. Or, à chaque coup, l'eau suintait à travers la paroi, et apparaissait à l'extérieur comme un dépôt de rosée, ce qui démontrait la porosité du métal.

17. **Volume apparent et volume réel.** — Eu égard à la porosité, il y a lieu de distinguer, dans tout corps, le *volume apparent*, c'est-à-dire la portion de l'espace qu'occupe le corps, et le volume *réel*, qui serait celui qu'*occuperait la matière* propre du c

les pores pouvaient être anéantis ; en d'autres termes, le volume réel est le volume apparent diminué du volume des pores. Le volume réel d'un corps est invariable ; mais le volume apparent diminue ou augmente avec le volume des pores.

18. **Applications.** — La porosité est utilisée dans les filtres de papier, de feutre, de pierre, de charbon. Les pores de ces substances sont assez grands pour laisser passer les liquides, mais trop petits pour laisser passer les substances que ceux-ci tiennent en suspension. Dans les carrières, on pratique, dans les blocs de pierre, des rainures où l'on introduit des coins de bois bien secs ; ceux-ci étant ensuite humectés, l'eau pénètre dans leurs pores, le bois se gonfle et détache des blocs considérables. Les cordes sèches, si on les mouille, augmentent en diamètre et diminuent en longueur ; de là un moyen puissant qu'on a utilisé pour soulever d'énormes fardeaux.

19. **Compressibilité.** — La *compressibilité* est la propriété qu'ont les corps de pouvoir se réduire à un moindre volume par l'effet de la pression. Cette propriété est la conséquence de la porosité, dont elle est elle-même une preuve.

La compressibilité est très-variable d'un corps à un autre. Les corps les plus compressibles sont les gaz, qui peuvent être réduits, sous des pressions suffisantes, à un volume 10, 20 et même 100 fois plus petit que celui qu'ils occupent dans les conditions ordinaires. Toutefois, pour la plupart des gaz, on rencontre une limite de pression au delà de laquelle l'état gazeux ne persiste plus, mais est remplacé par l'état liquide.

La compressibilité des solides est bien moindre que celle des gaz, et se présente à des degrés très-différents. Les étoffes, le papier, le liége, le bois, sont les substances les plus compressibles. Les métaux le sont aussi, comme l'indiquent les empreintes que prennent les médailles sous le choc du balancier. Il est à remarquer que la compressibilité des solides a aussi une limite au delà de laquelle les corps, cédant à la pression, se désagrégent tout à coup et se réduisent souvent en poudre impalpable.

Quant aux liquides, leur compressibilité est tellement faible, qu'ils ont été longtemps regardés comme tout à fait incompressibles ; mais elle se constate par l'expérience, ainsi qu'il sera démontré en hydrostatique.

20. **Élasticité.** — L'*élasticité* est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur forme ou leur volume primitif, lorsque la force qui altérait cette forme ou ce volume cesse d'agir. L'élasticité peut être développée dans les corps par pression, par traction, par *flexion ou par* torsion. Il ne sera question ici, comme propriété

générale, que de l'élasticité de pression ; les autres espèces d'élasticités, ne pouvant se produire que dans les solides, seront placées au nombre des propriétés particulières à ces corps (70).

Les gaz sont parfaitement élastiques, c'est-à-dire qu'ils reprennent exactement le même volume aussitôt que la pression redevient la même. Il en est encore ainsi des liquides, à quelque pression qu'ils aient été soumis. Aucun corps solide n'est doué d'une elasticité aussi parfaite que les gaz et les liquides, surtout lorsque les pressions ont été longtemps prolongées. Cependant l'élasticité est très-apparente dans le caoutchouc, l'ivoire, le verre ; elle est à peine sensible dans les graisses, les argiles, le plomb.

Dans les solides, il y a une limite d'élasticité au delà de laquelle ils sont brisés, ou du moins ne reprennent plus exactement leur forme ou leur volume primitif. Dans les entorses, par exemple, la limite d'élasticité des ligaments a été dépassée. Une semblable limite ne se rencontre pas dans les gaz et les liquides.

L'élasticité est le résultat d'un rapprochement moléculaire, et, par suite, d'un changement de forme qui, dans les corps solides, se constate par l'expérience suivante. Sur un plan de marbre poli et recouvert d'une légère couche d'huile, on laisse tomber une petite bille d'ivoire ou de marbre. Elle rebondit à une hauteur un peu moindre que celle de la chute, après avoir produit, au point où elle a frappé, une empreinte circulaire d'autant plus étendue, que la bille est tombée d'une plus grande hauteur. Au moment du choc, la bille a donc été aplatie sur le plan, et c'est par la réaction des molécules ainsi comprimées qu'elle se relève.

21. **Mobilité, mouvement, repos.** — La *mobilité* est la propriété qu'ont les corps de pouvoir passer d'un lieu à un autre.

On nomme *mouvement* l'état d'un corps qui change de lieu ; *repos*, sa permanence dans le même lieu. Le repos et le mouvement sont absolus ou relatifs.

Le *repos absolu* serait la privation complète de mouvement. Dans tout l'univers, on ne connaît aucun corps dans cet état.

Le *mouvement absolu* d'un corps serait son déplacement par rapport à un autre corps à l'état de repos absolu.

Le *repos relatif*, ou apparent, est l'état d'un corps qui paraît fixe par rapport aux corps environnants, mais qui, en réalité, participe avec eux à un mouvement commun. Par exemple, un corps qui reste à la même place dans un bateau en mouvement, est en repos par rapport au bateau, mais il est réellement en mouvement par rapport aux rives ; ce n'est donc là qu'un repos relatif.

Le *mouvement relatif* d'un corps n'est que son mouvement apparent, c'est-à-dire celui qu'on mesure par rappo

corps qu'on suppose fixes, tandis qu'eux-mêmes se déplacent. Tel est le mouvement d'un bateau par rapport aux rives d'un fleuve ; car celles-ci participent avec lui au double mouvement de rotation et de translation de la terre dans l'espace.

On n'observe, dans la nature, que des états de repos et de mouvement relatifs.

22. Inertie. — L'inertie est l'inaptitude de la matière à passer d'elle-même de l'état de repos à l'état de mouvement, ou à modifier le mouvement dont elle est animée.

Si les corps tombent lorsqu'on les abandonne à eux-mêmes, cela provient d'une force qui les dirige vers le centre de la terre, et non de leur spontanéité ; si la vitesse d'une bille sur un billard se ralentit graduellement, cela résulte de la résistance de l'air que la bille déplace et du frottement sur le tapis. Toutes les fois qu'il n'y a pas de résistance, le mouvement se continue sans altération, ainsi que les astres nous en offrent un exemple dans leur révolution autour du soleil.

23. Applications. — Un grand nombre de phénomènes s'expliquent par l'inertie de la matière. Par exemple, lorsque, pour franchir un fossé, nous prenons notre élan, c'est afin qu'au moment du saut, le mouvement dont nous sommes animés ajoute son effet à l'effort musculaire que nous faisons pour sauter.

Une personne qui descend d'une voiture en marche participe au mouvement de cette voiture, et si elle n'imprime à son corps un mouvement en sens contraire à l'instant où elle touche le sol, elle est renversée dans la direction que suit la voiture.

Les marteaux, les pilons, les bocards, sont des applications de l'inertie. Il en est de même des roues de fonte qu'on nomme *volants*, qui servent à régulariser le mouvement des machines.

CHAPITRE III

NOTIONS SUR LES FORCES ET LES MOUVEMENTS

24. Forces. — On nomme *force* toute cause capable de produire le mouvement ou de le modifier.

L'action des muscles chez les animaux, la pesanteur, les attractions et les répulsions magnétiques ou électriques, la tension des vapeurs, sont des forces.

En général, on donne le nom de *puissances* aux forces qui *tendent à* produire un certain effet, et celui de *résistances* aux

forces qui s'opposent à cet effet. Les premières, tendant à accélérer à chaque instant le mouvement, sont dites *accélératrices;* les dernières sont *retardatrices.*

Les forces peuvent n'agir sur les corps que pendant un temps très-court, comme il arrive dans les chocs, dans l'explosion de la poudre, ou bien pendant toute la durée du mouvement. On exprime le premier effet en disant qu'elles sont *instantanées*, le second en disant qu'elles sont *continues;* mais il importe d'observer qu'on entend par là non pas deux espèces de forces, mais seulement deux modes d'action des forces.

25. **Équilibre.** — Plusieurs forces étant appliquées à un même corps, il peut arriver que, ces forces se neutralisant mutuellement, l'état de repos ou de mouvement du corps ne soit pas modifié. On a donné à cet état particulier des corps le nom d'*équilibre.*

26. **Caractères, unité et représentation des forces.** — Toute force est caractérisée : 1° par son *point d'application*, c'est-à-dire le point où elle agit immédiatement; 2° par sa *direction*, c'est-à-dire la ligne droite qu'elle tend à faire parcourir à son point d'application; 3° par son *intensité*, c'est-à-dire sa valeur par rapport à une autre force prise pour unité.

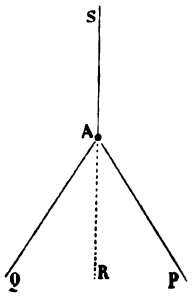
La force qu'on choisit pour unité est tout à fait arbitraire : mais, quel que soit l'effet de traction ou de pression produit par une force, un certain poids pouvant toujours produire le même effet, on compare, en général, les forces à des poids, et l'on prend pour unité de force le kilogramme. Une force est égale à 20 kilogrammes, par exemple, si elle peut être remplacée par l'action d'un poids de 20 kilogrammes. Une force qui conserve toujours la même intensité est *constante;* celle dont l'intensité augmente ou diminue est *variable.*

D'après les caractères qui déterminent une force, celle-ci est complétement connue lorsque son point d'application, sa direction et son intensité sont donnés. Pour représenter ces divers éléments d'une force, on mène par son point d'application, dans le sens de sa direction, une ligne droite indéfinie; puis, sur cette ligne, à partir du point d'application, et dans le sens de la force, on porte une unité de longueur arbitraire, le centimètre par exemple, autant de fois que la force donnée contient l'unité de force. On a ainsi une ligne droite qui détermine complétement la force. Pour distinguer les forces entre elles, on les désigne par les lettres P, Q, R..., qu'on place sur leurs directions respectives.

Pour l'intelligence de plusieurs phénomènes physiques, il est nécessaire de rappeler ici les principes suivants, qui sont démontrés dans les cours de mécanique.

27. **Résultantes et composantes.** — Lorsque plusieurs forces S, P, Q, appliquées à un même point matériel A (fig. 6), se font équilibre, l'une quelconque d'entre elles, S par exemple, résiste seule à l'action de toutes les autres. La force S, si elle était dirigée en

Fig. 6.



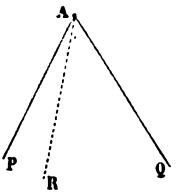


Fig. 7.

sens contraire, suivant le prolongement AR de SA, produirait donc, à elle seule, le même effet que le système des forces P et Q.

Toute force qui peut ainsi produire le même effet que plusieurs forces combinées, se nomme leur *résultante,* et les autres forces, par rapport à la résultante, sont ses *composantes.*

Lorsqu'un corps, sollicité par plusieurs forces, entre en mouvement, on démontre que c'est toujours suivant la direction de la résultante de toutes ces forces qu'il se meut. Par exemple, si un point matériel A (fig. 7) est sollicité en même temps par deux forces P et Q, comme il ne peut se mouvoir simultanément suivant les droites AP et AQ, il prend une direction intermédiaire AR, qui est précisément celle de la résultante des deux forces P et Q.

Tous les problèmes sur la *composition* et la *décomposition* des forces s'appuient sur les théorèmes suivants, pour la démonstration desquels nous renvoyons aux traités spéciaux de mécanique.

28. **Composition et décomposition des forces parallèles.** — 1° *Lorsque deux forces parallèles sont appliquées à un même point, elles ont une résultante égale à leur somme, si elles sont de même direction, et à leur différence, si elles sont de directions contraires.* Par exemple, si deux hommes tirent un fardeau suivant des directions parallèles, avec les efforts respectifs 20 et 15, l'effort résultant est 35, ou 5, suivant qu'ils tirent dans le même sens ou en sens contraires.

2° *Lorsque deux forces parallèles et de même direction sont appliquées aux extrémités d'une droite* AB (fig. 8), *leur résultante* R, *qui est égale à leur somme, leur est parallèle, et par-*

tage la droite AB *en deux parties inversement proportionnelles aux forces* P *et* Q. En d'autres termes, C étant le point d'application de la résultante, si P est deux, trois fois plus grande que Q, la distance AC est deux, trois fois plus petite que CB. Par suite, lorsque les forces P et Q sont égales, la direction de leur résultante partage la ligne AB en deux parties égales.

Réciproquement, une force unique R, appliquée en C, peut être remplacée par le système de deux forces P et Q dont elle est la somme, si celles-ci lui sont parallèles, et si, les points A, B, C étant en ligne droite, ces nouvelles forces sont en raison inverse des longueurs AC et CB.

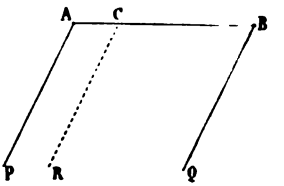


Fig. 8.

Pour obtenir la résultante de plusieurs forces parallèles et dirigées dans le même sens, on cherche, comme on a vu ci-dessus, la résultante de deux de ces forces, puis celle de la résultante trouvée et d'une troisième force, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière; ce qui produit, pour résultante finale, une force égale à la somme des forces données, de même direction, et appliquée en un point qui est invariable, quelle que soit la direction des forces, pourvu qu'elles restent parallèles entre elles. De là le nom de *centre des forces parallèles* donné à ce point.

29. **Composition et décomposition des forces concourantes.** — On appelle *forces concourantes* celles dont les directions se rencontrent en un même point où l'on peut les supposer toutes appliquées. Par exemple, lorsque plusieurs hommes, pour sonner une cloche, tirent des cordeaux fixés à un même nœud sur la corde de cette cloche, les forces de ces hommes sont concourantes.

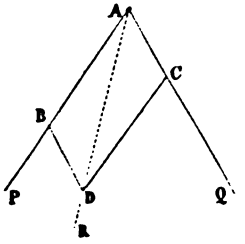


Fig. 9.

Soient d'abord deux forces concourantes P et Q (fig. 9), et A leur point d'application. Si l'on prend sur leurs directions deux longueurs AB et AC proportionnelles à leurs intensités (26), et si, des points B et C, on tire des droites respectivement parallèles aux directions des forces, on obtient un parallélogramme ABDC qu'on nomme *parallélogramme des forces*, et qui fait connaître facilement la résultante des forces P et Q, au moyen du théorème suivant, dit *théorème du parallélogramme des forces.*

30. **Parallélogramme des forces.** — *La résultante*

forces concourantes est représentée, en direction et en grandeur, par la diagonale du parallélogramme construit sur ces forces. C'est-à-dire que, dans la figure ci-dessus, la résultante R des forces P et Q est non-seulement dirigée suivant la diagonale AD, mais contient l'unité de force autant de fois que cette diagonale contient elle-même l'unité linéaire qui a été portée sur AB et AC pour représenter les forces P et Q.

Réciproquement, une force unique peut être décomposée en deux autres appliquées au même point que la première et dirigées suivant des droites données. Il suffit, pour cela, de construire sur ces droites un parallélogramme dont la force donnée soit la diagonale; les longueurs des côtés représentent les composantes cherchées.

Dans le cas d'un nombre quelconque de forces appliquées à un même point, dans diverses directions, la résultante s'obtient en appliquant successivement le théorème précédent d'abord à deux de ces forces, puis à la résultante obtenue et à une troisième force, et ainsi de suite jusqu'à la dernière.

NOTIONS SUR LES MOUVEMENTS

31. **Différents genres de mouvement.** — On a déjà vu (21) que le *mouvement* est l'état d'un corps qui passe d'un lieu à un autre. Un mouvement est *rectiligne* ou *curviligne*, suivant que le chemin parcouru par le mobile est une ligne droite ou une ligne courbe, et chacun de ces mouvements peut être lui-même *uniforme* ou *varié*.

32. **Mouvement uniforme.** — Le *mouvement uniforme*, le plus simple de tous, est celui dans lequel un mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux.

Toute force instantanée produit un mouvement rectiligne et uniforme, lorsque le mobile n'est soumis à aucune autre force et ne rencontre aucune résistance. En effet, la force n'agissant que pendant un temps très-court, le mobile, une fois abandonné à lui-même, conserve, en vertu de son inertie, la direction et la vitesse que la force lui a imprimées. Toutefois les forces continues peuvent aussi donner naissance à des mouvements uniformes. Il en est ainsi lorsqu'il se présente des résistances qui, se renouvelant sans cesse, détruisent l'accroissement de vitesse que ces forces tendent à communiquer au mobile. Par exemple, un convoi qui, sur un chemin de fer, est sollicité par une force continue, n'en prend pas moins un mouvement uniforme; car les pertes de force dues à la résistance de l'air et au frottement croissant avec la vitesse, il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force motrice et les résistances.

33. **Vitesse et loi du mouvement uniforme.** — Dans le mouve-

ment uniforme, on nomme *vitesse* le chemin parcouru dans l'unité de temps. Cette unité, tout à fait arbitraire, est généralement la seconde. Il découle de la définition du mouvement uniforme que la vitesse est constante. Dans des temps deux, trois, quatre fois plus grands, les chemins parcourus sont donc doubles, triples, quadruples. Cette loi s'exprime en disant que *les espaces parcourus sont proportionnels aux temps.*

Cette loi peut se représenter par une formule très-simple. Pour cela, soient v la vitesse, t le temps, et e l'espace parcouru. Puisque v représente l'espace parcouru dans l'unité de temps, l'espace parcouru dans 2, 3... unités de temps, sera $2v$, $3v$...; et, enfin, dans le temps t, il sera t fois v; on a donc $e=vt$. On tire de cette formule, $v=\frac{e}{t}$; d'où l'on peut dire que, dans le mouvement uniforme, *la vitesse est le rapport du chemin parcouru au temps employé à le parcourir.*

34. **Mouvement varié.** — Le *mouvement varié* est celui dans lequel un mobile parcourt en temps égaux des espaces inégaux. Ce mouvement peut varier d'une infinité de manières; le seul qu'il importe de considérer ici est le mouvement *uniformément varié.*

On nomme ainsi celui dans lequel la vitesse croît ou décroît de quantités égales en temps égaux. Dans le premier cas, le mouvement est *uniformément accéléré :* tel est celui d'un corps qui tombe, abstraction faite de la résistance de l'air. Dans le second, il est *uniformément retardé :* tel est le mouvement d'une pierre lancée verticalement de bas en haut.

Le mouvement uniformément varié a toujours pour cause une force continue constante, agissant comme puissance ou comme résistance, suivant que le mouvement est accéléré ou retardé.

35. **Vitesse et lois du mouvement uniformément accéléré.** — Dans le mouvement uniformément accéléré, les espaces parcourus en temps égaux n'étant pas égaux, la vitesse n'est plus, comme dans le mouvement uniforme, le chemin parcouru dans l'unité de temps. Ici on entend par *vitesse*, en un instant donné, l'espace qui, à partir de cet instant, serait uniformément parcouru par le mobile, dans chaque seconde, si la force accélératrice cessait tout à coup, c'est-à-dire si le mouvement devenait uniforme. Par exemple, si l'on dit d'un mobile qu'il a une vitesse de 60 mètres après 10 secondes d'un mouvement uniformément accéléré, on exprime que, si la force accélératrice qui a agi jusqu'alors cessait après 10 secondes, le mobile, en vertu de son inertie, continuerait à se mouvoir en parcourant uniformément 60 mètres par seconde.

Tout mouvement uniformément accéléré, quel que soit son accroissement de vitesse, est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Les vitesses croissent proportionnellement aux temps.* C'est-à-dire qu'après un temps double, triple, quadruple, la vi-

tesse est deux, trois, quatre fois plus grande. Cette loi est la conséquence de la définition du mouvement uniformément varié (34).

2° *Les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.* C'est-à-dire que, si l'on représente par 1 le chemin parcouru en 1 seconde, les chemins parcourus en 2, 3, 4, 5... secondes, seront représentés par 4, 9, 16, 25...

Si l'on représente par a l'accroissement de vitesse par seconde, et qu'on suppose le mobile sans vitesse initiale, c'est-à-dire partant du repos, sa vitesse au bout d'une seconde est a, au bout de deux secondes $2a$, et ainsi de suite; donc, la vitesse étant v au bout de t secondes, on a $v=at$ [1], formule qui est l'expression de la première loi ci-dessus.

Pour représenter la deuxième, observons qu'un corps, qui se meut pendant t secondes d'un mouvement uniformément accéléré, avec une vitesse initiale nulle et une vitesse finale at, parcourt nécessairement le même chemin que s'il était animé d'un mouvement uniforme avec une vitesse moyenne entre les vitesses zéro et at, c'est-à-dire avec la vitesse $\frac{at}{2}$. Donc, d'après la formule connue, $e=vt$, du mouvement uniforme (33), on a $e=\frac{at}{2}\times t$, ou $e=\frac{1}{2}at^2$ [2], formule qui représente la seconde loi du mouvement uniformément accéléré.

Des formules [1] et [2] ci-dessus on tire, en éliminant t, $v^2=2ae$, d'où $v=\sqrt{2ae}$, formule qui a de nombreuses applications.

Réciproque de la loi des espaces. — La formule [2] ci-dessus fait voir que, dans tout mouvement uniformément accéléré, les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps; or, réciproquement, *tout mouvement, dans lequel les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps, est uniformément accéléré.*

En effet, si le temps t prend un accroissement très-petit t', l'espace parcouru e prend un accroissement e', aussi très-petit, et la formule [2] devient

$$e+e'=\frac{1}{2}a(t+t')^2, \text{ ou } e+e'=\frac{1}{2}at^2+att'+\frac{1}{2}at'^2 \text{ [3].}$$

De l'égalité [3] retranchant l'égalité [2] membre à membre, on tire

$$e'=att'+\frac{1}{2}at'^2, \text{ d'où } \frac{e'}{t'}=at+\frac{1}{2}at' \text{ [4].}$$

Or, t' pouvant devenir aussi petit que l'on veut, il est permis de supposer la vitesse constante pendant l'intervalle t', ce qui donne $\frac{e'}{t'}=v$. De plus, le terme $\frac{1}{2}at'$ ayant pour limite zéro, c'est-à-dire pouvant décroître jusqu'à zéro, on peut le négliger; l'égalité [4] devient donc $v=at$, formule qui est bien celle de la première loi du mouvement uniformément accéléré.

36. Proportionnalité des forces aux accélérations; quantité de mouvement. — On démontre, en mécanique rationnelle, que, lorsque plusieurs forces constantes F, F′, F″....., agissent successivement sur un même corps, elles lui impriment, en temps égaux, des accélérations de vitesse G, G′, G″....., proportionnelles à ces forces, c'est-à-dire qu'on a $\frac{F}{F'}=\frac{G}{G'}$, $\frac{F}{F''}=\frac{G}{G''}$.....

Ce principe permet donc de mesurer les forces par les accélérations de vitesse qu'elles communiquent aux mobiles, les forces étant estimées en kilogrammes et les vitesses en mètres; de plus, comme des égalités ci-dessus on tire $\frac{F}{G}=\frac{F'}{G'}=\frac{F''}{G''}$....,

on voit que, pour un même corps, le rapport entre la force qui le sollicite et l'accélération de vitesse qu'elle lui communique est constant, quelle que soit la force.

C'est ce rapport constant que les mécaniciens ont adopté pour mesurer la *masse* des corps (4), et ils disent *que deux corps sont de même masse, quand, sollicités par des forces égales, ils prennent, dans le même temps, des accélérations de vitesse égales.*

En représentant par M et m les masses de deux corps, par F et f les forces qui agissent sur eux, et par V et v les vitesses qu'elles leur communiquent dans le même temps, on a donc $\frac{F}{V}=M$, et $\frac{f}{v}=m$; ou $F=MV$, et $f=mv$. Divisant ces deux dernières égalités membre à membre, on a $\frac{F}{f}=\frac{MV}{mv}$.

Le produit MV de la masse d'un corps par la vitesse dont il est animé, a reçu le nom de *quantité de mouvement* de ce corps. On peut donc énoncer la dernière égalité ci-dessus en disant que *deux forces quelconques sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles impriment à deux masses différentes.* Par conséquent, si l'on prend pour unité de force celle qui imprimerait à l'unité de masse l'unité de vitesse dans l'unité de temps, on voit que les forces peuvent se mesurer par les quantités de mouvement qui leur correspondent.

Les forces étant proportionnelles aux quantités de mouvement, il en résulte que pour une même force le produit MV est constant; c'est-à-dire que la masse devenant deux, trois fois plus grande, la vitesse est deux, trois fois plus petite. Ce résultat se déduit de la dernière égalité ci-dessus, en y faisant $F=f$, ce qui donne $MV=mv$, ou $\frac{M}{m}=\frac{v}{V}$; c'est-à-dire *que les vitesses imprimées par une même force à deux masses inégales sont en raison inverse de ces masses.*

Si $V=v$, on a $\frac{F}{f}=\frac{M}{m}$; c'est-à-dire que *deux forces sont entre elles comme les masses auxquelles elles impriment des vitesses égales.*

37. Force vive, travail mécanique. — On nomme *force vive* d'un corps animé d'une vitesse V *le produit* MV^2 *de la masse de ce corps par le carré de sa vitesse;* et *travail mécanique* d'une force, pendant un temps donné, *le produit de l'intensité de cette force par le chemin parcouru dans le même temps, dans le sens de sa direction, par son point d'application;* c'est-à-dire que T étant le travail, F l'intensité de la force et E le chemin parcouru, on a $T=F\times E$, l'effort F étant mesuré en kilogrammes, et le chemin E en mètres. Quant à l'unité du travail mécanique, elle est le *kilogrammètre.* On nomme ainsi le travail nécessaire pour élever 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur en 1 seconde. Par exemple, si un homme élève 25^k à 12^m de hauteur en 1 minute, son travail mécanique par seconde est $\frac{25\times 12}{60}=5$ kilogrammètres.

38. Relation entre le travail mécanique et la force vive. — Il existe, entre la force vive que possède un corps en mouvement et le travail mécanique qu'il a fallu dépenser pour lui imprimer la vitesse dont il est animé, cette relation simple que *le travail est la moitié de la force vive;* c'est-à-dire que $T=\frac{1}{2}MV^2$.

En effet, si une force F imprime, dans le temps t, la vitesse V à une masse M, la quantité de mouvement communiquée dans l'unité de temps est $\frac{MV}{t}$. Par suite, prenant pour unité de force, comme on l'a vu ci-dessus (26), celle qui imprime l'unité de vitesse à l'unité de masse dans l'unité de temps, on a $F=\frac{MV}{t}$ [1]. Mais la vitesse du mobile passant de zéro à V, sa vitesse moyenne

est $\frac{V}{2}$: et le chemin E parcouru dans le temps t est $\frac{V}{2} \times t$; donc on a

$E = \frac{Vt}{2}$ [2]. Multipliant membre à membre les égalités [1] et [2], il vient

$$F \times E = \frac{MV}{t} \times \frac{Vt}{2} \text{ ou } T = \frac{1}{2} MV^2$$

39. **Principe général des forces vives.** — Quelle que soit la force qui agit sur un corps pour accélérer ou retarder son mouvement, *la quantité de travail mécanique développée égale la moitié de la variation de la force vive du corps.*

En effet, soient v et v' les vitesses imprimées à une masse M par une force constante F dans les temps t et t', e et e' les espaces parcourus dans les mêmes temps, et a l'accélération de vitesse par seconde : on sait (35) qu'on a

$$v^2 = 2ae, \text{ et } v'^2 = 2ae', \text{ d'où } v'^2 - v^2 = 2a(e' - e) \quad [1].$$

Or on a vu ci-dessus (34) que $F = Ma$, d'où $a = \frac{F}{M}$; portant cette valeur de a dans l'égalité [1] et réduisant, il vient :

$$F(e' - e) = \frac{1}{2} M(v'^2 - v^2) \quad [2].$$

équation qui n'est autre chose que l'expression du principe énoncé ci-dessus, puisque le premier membre est le travail consommé pour faire passer la masse M de la vitesse v à la vitesse v', et le second membre la demi-différence entre les forces vives Mv'^2 et Mv^2 possédées par le mobile après les temps t' et t.

L'équation [2], qu'on nomme *équation du travail*, établit l'équivalence entre le travail et la force vive. Toutefois, obtenue théoriquement, elle ne se vérifie pas dans la pratique à cause des pertes de force vive par les frottements et par les chocs, même dans les meilleures machines. Or, en tenant compte de ces pertes, on observe encore qu'une certaine quantité de force vive disparaît. On a longtemps expliqué cette déperdition en disant qu'il y avait de la force vive *détruite*. Dans la nouvelle théorie dynamique, où la force vive est indestructible comme la force et le mouvement, la quantité de force vive qu'on ne retrouve pas dans le second membre de l'équation du travail n'est pas anéantie, mais transformée en *force vive moléculaire*, qui se manifeste sous forme de chaleur, et même d'électricité, de magnétisme et de lumière, comme on en verra plus tard de nombreux exemples.

Le principe de l'équivalence entre le travail mécanique et la force vive rencontrera une importante application dans la détermination de l'*équivalent mécanique* de chaleur (405).

LIVRE II

ATTRACTION UNIVERSELLE, PESANTEUR ET FORCES MOLÉCULAIRES

CHAPITRE PREMIER

EFFETS GÉNÉRAUX DE LA PESANTEUR

40. **Attraction universelle, ses lois.** — L'*attraction universelle* est une force en vertu de laquelle tous les corps de l'univers tendent sans cesse les uns vers les autres.

Cette force agit sur tous les corps, qu'ils soient en repos ou en mouvement. Elle est toujours réciproque entre eux, et s'exerce à toutes les distances, ainsi qu'à travers toutes les substances.

L'attraction universelle prend le nom de *gravitation*, lorsqu'elle s'exerce entre les astres; celui de *pesanteur*, quand on considère l'attraction que la terre exerce sur les corps pour les faire tomber; tandis qu'on donne le nom d'*attraction moléculaire* à la force qui lie entre elles les molécules des corps. On va voir ci-après quelles sont les lois de la gravitation et de la pesanteur, mais on ignore celles de l'attraction moléculaire.

Les philosophes de l'antiquité avaient adopté l'hypothèse d'une tendance de la matière vers des centres communs sur la terre et sur les astres. Képler admit une attraction réciproque entre le soleil et les planètes. Bacon, Galilée, Hooke, ont également reconnu une attraction universelle; mais c'est Newton qui, le premier, se fondant sur les lois de Képler sur le mouvement des planètes, a démontré que la gravitation est une loi générale de la nature, et que *tous les corps s'attirent entre eux en raison composée des masses et en raison inverse du carré des distances.*

Depuis Newton, l'attraction de la matière par la matière a été démontrée expérimentalement par Cavendish, célèbre chimiste et physicien anglais. Ce savant, au moyen d'un appareil qu'on nomme *balance de Cavendish*, et qui n'est autre chose qu'une balance de torsion (71), est parvenu à rendre sensible l'attraction exercée par une grosse boule de plomb sur une petite sphère de cuivre.

L'attraction universelle est un fait rigoureusement prouvé par les mouvements relatifs des astres; mais on en ignore complétement la cause. Depuis Newton, on s'est habitué à la req

comme une propriété intrinsèque de la matière. Cependant l'illustre auteur de la théorie de la gravitation universelle dit lui-même qu'il n'a parlé de la gravitation universelle que comme d'un fait, d'une force démontrée par l'observation; mais il n'assigne pas la cause de cette force, se bornant à dire que les phénomènes se produisent *comme si la matière s'attirait.*

En effet, admettre que la matière est inerte, et admettre qu'elle s'attire, sont deux idées incompatibles; c'est pourquoi, quoique ignorant la cause de l'attraction à distance, ne doit-on pas la regarder comme une cause occulte émanant de la matière [1].

41. **Pesanteur.** — La pesanteur est la force en vertu de laquelle les corps abandonnés à eux-mêmes *tombent*, c'est-à-dire se dirigent vers le centre de la terre. Cette force, qui n'est qu'un cas particulier de l'attraction universelle, est due à l'attraction réciproque qui s'exerce entre la masse de la terre et celle des corps.

Ainsi que la gravitation universelle, la pesanteur agit en raison inverse du carré de la distance et proportionnellement à la masse. Elle s'exerce sur tous les corps, dans quelques conditions qu'ils se trouvent, et si quelques-uns, comme les nuages, la fumée, semblent s'y soustraire en s'élevant dans l'atmosphère, on verra bientôt (173) qu'il faut en rapporter la cause à la pesanteur même.

42. **Direction de la pesanteur, verticale, horizontale.** — Lorsque les molécules d'une sphère matérielle agissent par attraction, en raison inverse du carré de la distance, sur une molécule située hors de cette sphère, on démontre, en mécanique rationnelle, que la résultante de toutes ces attractions est la même que si toutes les molécules de la sphère étaient condensées à son centre. Il résulte de ce principe qu'en chaque point de la surface du globe, l'attraction de la terre est dirigée vers son centre. Toutefois l'aplatissement de la terre aux pôles, la non-homogénéité de ses parties, les inégalités de sa surface, sont autant de causes qui peuvent changer la direction de la pesanteur, mais d'une quantité peu sensible.

On nomme *verticale* la direction de la pesanteur, c'est-à-dire la ligne droite que suivent les corps en tombant. Sur tous les points

[1] « S'il est quelque chose de certain au monde, dit l'abbé Moigno (*Matière et Force*, p. 57), c'est que les molécules des corps, et les corps eux-mêmes ne s'attirent pas réellement; c'est que l'attraction n'est pas une force réelle, mais seulement une force explicative; c'est que tout se passe comme si les corps s'attiraient, quoiqu'il soit incontestablement vrai que les corps ne s'attirent pas. Newton, comme Euler, comme tous les philosophes dignes de ce nom, n'ont pu voir dans la matière que deux choses, l'inertie et le mouvement primitivement imprimé par une volonté libre, moteur premier et infini. Et c'est avec ces deux grandes choses, l'inertie et le mouvement, que la science avancée doit pouvoir expliquer un jour tous les phénomènes du monde physique. »

du globe, les verticales convergeant sensiblement vers le centre, leur direction change d'un lieu à un autre; mais, pour des points peu distants les uns des autres, tels que les molécules d'un même corps ou de corps voisins, on regarde les verticales comme rigoureusement parallèles; en effet, le rayon moyen de la terre, c'est-à-dire celui qui correspond à la latitude de 45°, étant de 6 367 400 mètres, les angles de ces verticales entre elles sont inappréciables. Toutefois, pour deux points éloignés l'un de l'autre, l'angle n'est pas négligeable. Il est d'environ 2° 12′ entre les verticales de Paris et de Dunkerque, et de 7° 28′ entre celles de Paris et de Barcelone. L'angle formé ainsi par les verticales de deux lieux différents, s'obtient en observant, de chacun d'eux, une même étoile, et mesurant l'angle que le rayon visuel fait avec la verticale. La différence des angles trouvés est l'angle des deux verticales entre elles.

On entend par *ligne horizontale*, *plan horizontal*, une ligne, un plan perpendiculaires à la verticale.

43. **Fil à plomb.** — La verticale en un lieu quelconque se détermine par le *fil à plomb*. On nomme ainsi un fil auquel est suspendue une petite balle de plomb (fig. 10). Ce fil, étant fixé par son extrémité supérieure et abandonné à lui-même, prend naturellement la direction verticale; car on verra bientôt qu'un corps qui n'a qu'un point d'appui, ne peut être en équilibre qu'autant que son centre de gravité et le point d'appui sont situés sur une même verticale (47).

Fig. 10.

Le fil à plomb ne peut indiquer si la direction de la pesanteur en un lieu est constante. En effet, si l'on observait que le fil à plomb, d'abord parallèle au mur d'un édifice, a cessé de l'être, on ne saurait dire si c'est la pesanteur qui a changé de direction, ou si c'est le mur qui s'est incliné. Mais, en traitant des propriétés des liquides, nous verrons que leur surface ne peut demeurer horizontale, ou *être de niveau*, qu'autant qu'elle est perpendiculaire à la direction de la pesanteur (88). Par conséquent, si cette direction changeait, il en serait de même du niveau des mers. La stabilité de ce niveau est donc une preuve que la direction de la pesanteur est constante.

Toutefois, près d'une grande masse de matière, comme une montagne, le fil à plomb est dévié : la Condamine et Bouguer ont constaté que la montagne de Chimboraço imprime au fil à plomb une déviation de 7″,5.

CHAPITRE II

DENSITÉ, POIDS, CENTRE DE GRAVITÉ, BALANCES

44. **Densité absolue et densité relative.** — La *densité* d'un corps est sa masse sous l'unité du volume (4). On ne peut assigner la *densité absolue*, c'est-à-dire la quantité réelle de matière qu'un corps renferme, mais seulement sa *densité relative*, c'est-à-dire la quantité de matière qu'il contient, à volume égal, par rapport à un autre corps pris pour terme de comparaison. Ce corps, pour les solides et les liquides, est l'eau distillée, prise à 4 degrés au-dessus de zéro; pour les gaz, c'est l'air. Par conséquent, quand on dit que la densité du zinc est 7, cela signifie que, sous le même volume, ce métal contient 7 fois plus de matière que l'eau; c'est-à-dire qu'on prend la densité de l'eau pour unité.

En représentant par V le volume d'un corps, par M sa masse absolue, et par D sa quantité de matière sous l'unité de volume, c'est-à-dire sa densité absolue, la quantité totale de matière contenue dans le volume V est V fois D; d'où $M = VD$. De cette égalité on tire $D = \frac{M}{V}$; d'où l'on peut dire encore que *la densité absolue d'un corps est le rapport de sa masse à son volume.*

45. **Poids.** — On distingue, dans tout corps, le *poids absolu*, le *poids relatif* et le *poids spécifique*.

Le *poids absolu* d'un corps est la pression qu'il exerce sur l'obstacle qui l'empêche de tomber. Cette pression n'est autre chose que la résultante des actions de la pesanteur sur chacune des molécules du corps; d'où il résulte qu'elle est d'autant plus grande, que le corps contient plus de matière; ce qu'on exprime en disant que *le poids d'un corps est proportionnel à sa masse.*

Le *poids relatif* est celui qui se détermine au moyen de la balance; c'est le rapport du poids absolu du corps à un autre poids déterminé qu'on a choisi pour unité. Dans le système métrique, cette unité est le gramme. Ainsi, quand on trouve qu'un corps pèse 58 grammes, 58 est son poids relatif. En adoptant une autre unité, le poids relatif changerait, mais le poids absolu serait le même.

Enfin, le *poids spécifique* d'un corps est le rapport de son poids, sous un certain volume, à zéro, à celui d'un égal volume d'eau distillée et à 4 degrés au-dessus de zéro. Par exemple, si l'on dit que le poids spécifique du zinc est 7, cela exprime qu'à volume égal le zinc à zéro pèse 7 fois plus que l'eau distillée prise à 4 degrés.

Le poids des corps, à volume égal, étant proportionnel à leur masse, si un corps contient deux, trois fois plus de matière que l'eau, il doit être, deux, trois fois plus pesant; par suite, le rapport entre les poids, ou le poids spécifique, doit être le même que le rapport entre les masses, ou la densité relative. C'est pourquoi les expressions *densité relative* et *poids spécifique* sont souvent regardées comme équivalentes. Toutefois, si la pesanteur était détruite, il n'y aurait plus ni poids absolu ni poids relatif, tandis qu'il y aurait toujours lieu de considérer les densités. Celles-ci ne pourraient se déterminer alors par la balance; mais on a vu (36) que le rapport des masses est le même que le rapport des forces qui imprimeraient à ces masses une même vitesse dans le même temps, ce qui permettrait encore de déterminer les densités.

On a vu également (36) que la masse d'un corps est égale au rapport constant de la force qui le sollicite à l'accélération de vitesse qu'elle lui imprime; si donc on représente par P le poids absolu d'un corps, c'est-à-dire la force qui tend à le faire tomber, par g l'accélération de vitesse que la pesanteur lui imprime, accélération qui peut être prise pour intensité de cette force, enfin par M la masse du corps, on a $\frac{P}{g}=M$, d'où $P=Mg$.

Cette formule fait voir que le poids d'un corps est proportionnel à sa masse et à l'intensité de la pesanteur. En y remplaçant M par sa valeur VD (44), on a $P=VDg$. Avec un autre corps dont le poids, le volume et la densité seraient P', V', et D', on aurait de même $P'=V'D'g$. Pour $D=D'$, on a $\frac{P}{P'}=\frac{V}{V'}$ [1]; et pour $P=P'$, on a $VD=V'D'$, d'où $\frac{V}{V'}=\frac{D'}{D}$ [2]. De l'égalité [1], on conclut qu'*à densité égale, les poids sont proportionnels aux volumes;* et de l'égalité [2], qu'*à poids égal, les volumes sont en raison inverse des densités.*

On verra bientôt les procédés à l'aide desquels on détermine les poids spécifiques des solides et des liquides par rapport à l'eau. Ceux des gaz se prennent par rapport à l'air.

46. Centre de gravité, sa détermination expérimentale. — Le *centre de gravité* d'un corps est le point par lequel passe constamment la résultante des actions de la pesanteur sur les molécules de ce corps dans toutes les positions qu'il peut prendre.

Tout corps a un centre de gravité unique. En effet, soit une masse quelconque (fig. 11), et m, m', m'', m'''....., ses molécules. Toutes celles-ci étant sollicitées par la pesanteur suivant des directions verticales, il en résulte un système de forces parallèles dont on obtient la résultante en cherchant d'abord celle des forces qui sollicitent deux molécules quelconques m et m' (28), puis la résultante de la force ainsi obtenue et de celle qui sollicite une troisième molécule m'', et ainsi de suite jusqu'à la résultante finale P, appliquée en G et représentant le poids du corps. Or, si l'on donne au

corps une autre position, comme le montre la figure 12, les molécules m, m', m''..., étant encore sollicitées par les mêmes forces que lorsque le corps était dans la position représentée dans la figure 11, la résultante des forces qui sollicitent m et m' continue à passer en o, puis la résultante suivante en o', et ainsi de suite jusqu'à la résultante finale P, qui passe encore en G, où elle coupe

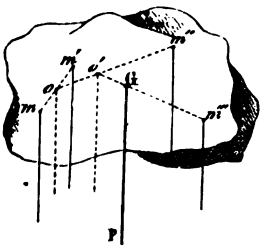


Fig. 11.

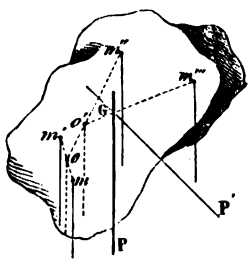


Fig. 12.

la direction GP' qu'avait la même résultante, par rapport au corps, dans la première position. La même chose ayant lieu dans toutes les positions qu'on donne au corps, le point G, par lequel passe constamment la direction du poids, est le centre de gravité; ce point est le même que le centre des forces parallèles (28).

La recherche du centre de gravité d'un corps quelconque est du domaine de la géométrie; mais, dans plusieurs cas, on peut le déterminer immédiatement. Par exemple, dans une ligne droite homogène, le centre de gravité se trouve au milieu de la droite; dans un cercle, il est au centre : il en est de même pour une sphère. Dans les cylindres, il est au milieu de l'axe. En statique, on fait voir que, dans un triangle, le centre de gravité se trouve sur la ligne qui joint un des sommets au milieu du côté opposé, et aux deux tiers de cette ligne à partir du sommet. Dans les pyramides, il est placé sur la droite qui joint le sommet au centre de gravité de la base, et aux trois quarts de cette droite à partir du sommet; il en est de même dans les cônes.

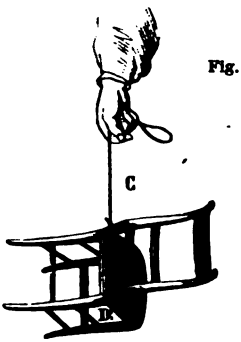
On peut, dans plusieurs cas, déterminer le centre de gravité par l'expérience. Pour cela, on suspend le corps à un cordeau, successivement dans deux positions différentes, comme le montrent les figures 13 et 14; puis on cherche le point où le cordeau CD, dans la seconde position, va couper la direction AB, qu'avait le cordeau dans la première : ce point est le centre de gravité cherché. En effet, dans chaque position, l'équilibre ne pouvant s'établir qu'autant que le centre de gravité vient se placer au-dessous du point

d'attache du cordeau et sur sa direction (47), il en résulte que le centre de gravité doit être placé à la fois sur les deux directions du cordeau, et, par conséquent, à leur point de rencontre.

Dans les corps dont la forme et l'homogénéité sont invariables,

Fig. 13.

Fig. 14.



la position du centre de gravité est constante; dans le cas contraire, la position de ce point change. C'est ce qui arrive chez les animaux, où la position du centre de gravité varie avec les attitudes.

47. **Équilibre des corps pesants.** — L'action de la pesanteur sur un corps se réduisant toujours à une force unique, verticale, dirigée de haut en bas, et appliquée au centre de gravité, il suffit, pour qu'il y ait équilibre, que cette force soit détruite par la résistance d'un point fixe par lequel elle passe. Par suite, si le corps repose sur un seul point d'appui, le centre de gravité doit se trouver sur la verticale menée par ce point; si le corps est soutenu par deux points, la verticale passant par le centre de gravité doit rencontrer la droite qui les joint; si le corps est supporté par plusieurs points, la verticale menée par le centre de gravité doit passer dans l'intérieur de la *base*, c'est-à-dire du polygone qu'on obtient en joignant les points d'appui.

Dans les tours de Pise et de Bologne, qui sont tellement inclinées à l'horizon, qu'elles semblent menacer les passants de leur chute, l'équilibre persiste, parce que la verticale menée par le centre de gravité de l'édifice passe dans l'intérieur de la base.

Un homme est d'autant plus ferme sur ses pieds, que ceux-ci présentent une base plus grande; car il peut alors donner à ses mouvements plus d'amplitude, sans que la verticale menée par son centre de gravité se trouve en dehors de cette base. S'il se

pose sur un pied, la stabilité diminue; elle diminue encore s'il s'élève sur la pointe du pied. Dans cette position, un très-faible balancement suffit pour que le centre de gravité ne soit plus au-dessus de la base, et pour rompre l'équilibre.

48. **Divers états d'équilibre.** — Selon la position du centre de gravité par rapport aux points d'appui, il se présente trois états d'équilibre : l'état d'*équilibre stable*, celui d'*équilibre instable*, et celui d'*équilibre indifférent*.

L'*équilibre stable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, y revient de lui-même aussitôt qu'aucun obstacle ne s'y oppose. Cet état se présente toutes les fois qu'un corps est dans une position telle, que son centre de gravité est plus bas que dans toute autre position voisine. Si le corps est alors déplacé, son centre de gravité ne peut être que relevé, et comme la pesanteur tend sans cesse à l'abaisser, elle le ramène, après une suite d'oscillations, à sa position première, et l'équilibre se rétablit. Tel est le cas d'un balancier d'horloge, ou celui d'un œuf sur un plan horizontal, lorsque son grand axe est sensiblement parallèle à ce plan.

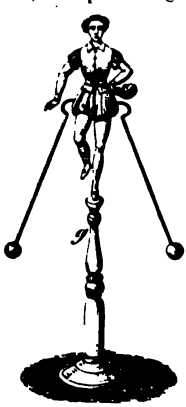


Fig. 15 (h=21).

Comme exemple d'équilibre stable, on construit de petites figures d'ivoire (fig. 15), qu'on fait tenir sur un pied en les chargeant de deux boules de plomb placées assez bas pour que, dans toutes les positions, le centre de gravité *g* des boules et des petites figures se trouve au-dessous du point d'appui.

L'*équilibre instable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, ne tend qu'à s'en écarter davantage. Cet état se présente toutes les fois qu'un corps est dans une position telle, que son centre de gravité est plus haut que dans toute autre position voisine; car, par un déplacement quelconque, le centre de gravité étant abaissé, la pesanteur ne tend qu'à l'abaisser davantage. Tel est le cas d'un œuf reposant sur un plan horizontal, de manière que son grand axe soit vertical, ou d'un bâton qu'on fait tenir en équilibre debout sur un doigt.

Enfin, on nomme *équilibre indifférent* celui qui persiste dans toutes les positions que peut prendre un corps. Ce genre d'équilibre se rencontre lorsque, dans les diverses positions du corps, son centre de gravité n'est ni relevé ni abaissé, ainsi qu'il arrive pour une roue de voiture soutenue par son essieu, ou pour une sphère reposant sur un plan horizontal.

La figure 16 représente trois cônes, A, B, C, placés respectivement dans les positions d'équilibre stable, instable et indifférent; la lettre *g* désigne la position du centre de gravité.

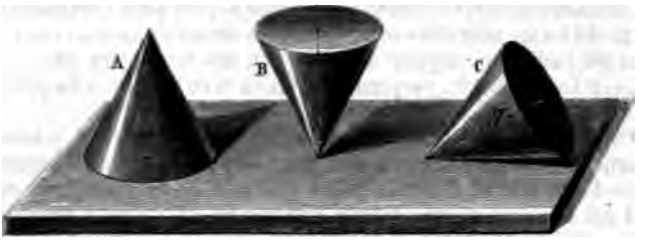


Fig. 16.

49. **Levier.** — Avant de faire connaître la théorie des balances, nous rappellerons ici une autre théorie qui appartient au cours de mécanique, celle du levier, sans laquelle ce qui a rapport aux balances ne peut être bien compris.

On nomme *levier* toute barre AB (fig. 17), droite ou courbe, s'appuyant sur un point fixe *c*, autour duquel elle est sollicitée à

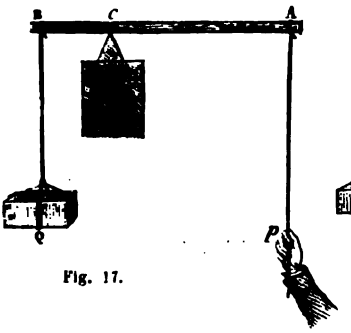


Fig. 17.

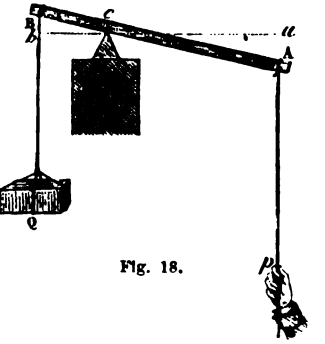


Fig. 18.

tourner en sens contraires par deux forces parallèles ou concourantes. Celle qui agit comme moteur est la *puissance*, l'autre est la *résistance*. Selon la position du point d'appui par rapport aux points d'application de la puissance et de la résistance, on distingue trois genres de leviers : 1° le *levier du premier genre*, quand le point d'appui est entre la puissance et la résistance; 2° le *levier du second genre*, lorsque la résistance est entre le point d'appui et la puissance; 3° le *levier du troisième genre*, quand la puissance se trouve entre le point d'appui et la rés

Dans les trois genres de leviers, les distances respectives de la puissance et de la résistance au point d'appui se nomment *bras de levier*. Si le levier est droit et perpendiculaire aux directions de ces deux forces, comme dans la figure 17, les deux portions Ac et Bc du levier sont elles-mêmes les bras de levier; mais si le levier est incliné par rapport à la direction des forces (fig. 18), les bras de levier sont les perpendiculaires *ca* et *cb* abaissées du point fixe sur les directions des forces.

Or on démontre en mécanique qu'une force qui tend à faire tourner un levier autour de son point d'appui, produit d'autant plus d'effet que sa direction passe plus loin de ce point, ou, ce qui est la même chose, qu'*elle agit sur un plus grand bras de levier*. Par suite, lorsque la puissance et la résistance ont même intensité et agissent sur des bras de levier égaux, elles produisent le même effet, mais en sens contraires, et dès lors se font équilibre; mais si elles agissent sur des bras de levier inégaux, si, par exemple, le bras de levier de la puissance est deux, trois fois plus grand que celui de la résistance, il découle du principe ci-dessus que les effets ne seront égaux qu'à la condition que la puissance soit deux, trois fois plus petite que la résistance, ce qu'on exprime en disant que, *pour que deux forces se fassent équilibre à l'aide d'un levier, leurs intensités doivent être en raison inverse des bras de levier auxquels elles sont appliquées.*

C'est-à-dire que, dans la figure 18, on a $\frac{P}{Q}=\frac{bc}{ac}$; d'où $P\times ac=Q\times bc$. Or, en mécanique, le produit $P\times ac$ d'une force par la perpendiculaire abaissée du centre de rotation *c* sur sa direction, se nomme *moment* de cette force par rapport à ce point. On peut donc énoncer l'égalité ci-dessus, en disant que, lorsque deux forces se font équilibre à l'aide d'un levier, *les moments de la puissance et de la résistance par rapport au point d'appui sont égaux.*

Ces notions données, nous passons à la théorie des balances.

50. **Balances.** — On nomme *balances* des instruments qui servent à déterminer le poids relatif des corps. On en construit de plusieurs sortes.

La balance ordinaire (fig. 19) consiste en un levier du premier genre *mn*, nommé *fléau*, dont le point d'appui est au milieu; aux deux extrémités sont suspendus des *bassins* ou *plateaux* P, Q, de même poids, destinés à recevoir, l'un les objets à peser, l'autre des poids cotés. Le fléau est traversé, en son milieu, par un prisme d'acier *ok* (fig. 21), qu'on nomme *couteau;* pour diminuer le frottement, l'arête vive de celui-ci, qui est l'*axe de suspension* du fléau, repose à ses deux bouts sur deux pièces polies *x, y*, d'agate ou d'acier, qui constituent la *chape*. Aux extrémités du fléau sont adaptés deux prismes plus petits, dont l'arête vive est en

haut et parallèle à celle du couteau central. C'est sur cette arête que reposent, à l'aide de crochets, les plateaux P et Q (fig. 20). Enfin, à la partie supérieure du fléau est fixée une longue aiguille qui oscille devant un arc gradué *a*, fixe et porté par une colonne

Fig. 19.

de laiton sur laquelle reposent la chape et le fléau. Quand ce dernier est bien horizontal, la pointe de l'aiguille correspond au milieu de l'arc. La colonne est portée par un pied à trois vis calantes, à l'aide desquelles on lui donne la position verticale.

Ces détails connus, il reste à chercher les conditions auxquelles doit satisfaire une balance : 1° pour être *précise*, c'est-à-dire pour donner des pesées exactes ; 2° pour être *sensible*, ou pour osciller sous l'influence d'une très-petite différence de poids.

31. **Conditions de précision.** — 1° *Les deux bras du fléau doivent être rigoureusement égaux en longueur et en poids ;* sinon, d'après la théorie du levier, il faudrait dans les bassins des poids inégaux pour se faire équilibre. Pour vérifier si les bras du fléau sont égaux, on place des poids dans les deux plateaux, de manière que le fléau prenne une position horizontale. Transposant

ensuite les poids respectivement d'un bassin dans l'autre, le fléau reste horizontal si les bras sont égaux; car, dans ce cas, les poids le sont aussi; sinon il incline du côté du bras le plus long.

Il ne suffit pas que les bras du fléau soient égaux, il faut que, pendant ses oscillations, leur longueur reste constante. C'est pour satisfaire à cette condition qu'on fait reposer les plateaux sur deux

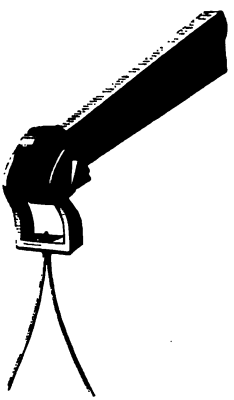


Fig. 20.

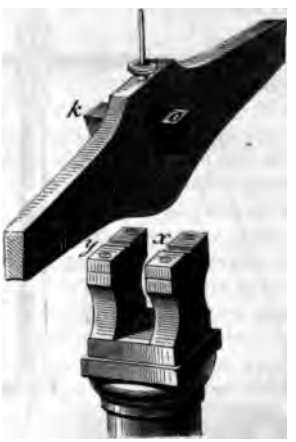


Fig. 21.

prismes aux arêtes vives desquels correspondent, dans toutes les inclinaisons, les points de suspension (fig. 20).

2° *Le centre de gravité du fléau, quand celui-ci est horizontal, doit se trouver sur la verticale qui passe par l'arête de suspension du couteau.* En effet, on a vu (47), pour un corps qui n'est soutenu que par un point ou par une droite, que l'équilibre n'est possible qu'autant que le centre de gravité est situé sur la verticale menée par ce point ou par cette droite.

3° *Le centre de gravité du fléau doit être au-dessous de l'arête du couteau.* Cette condition est nécessaire pour que l'équilibre du fléau soit stable; car, si son centre de gravité était au-dessus de l'arête de suspension, il ne pourrait prendre qu'un état d'équilibre instable (48), ce qu'on exprime en disant que la balance est *folle;* et si le centre de gravité coïncidait avec l'arête du couteau, l'effet de la pesanteur sur le fléau se trouvant détruit dans toutes les positions qu'on lui donne, il ne pourrait osciller, et ne ferait qu'incliner du côté où il y a excès de poids.

Lorsque les trois conditions ci-dessus sont satisfaites, les bas-

sins étant vides, la balance prend d'elle-même la position d'équilibre horizontale. Il en est encore ainsi quand on place dans les plateaux des poids égaux; car ceux-ci représentant des forces égales appliquées à deux bras de leviers égaux, il y a équilibre.

Si les poids sont inégaux, le fléau abandonne la position horizontale pour incliner vers le plus grand poids; mais il est à remarquer qu'il y a toujours une inclinaison du fléau pour laquelle le poids de celui-ci fait équilibre à la différence des poids qui sont

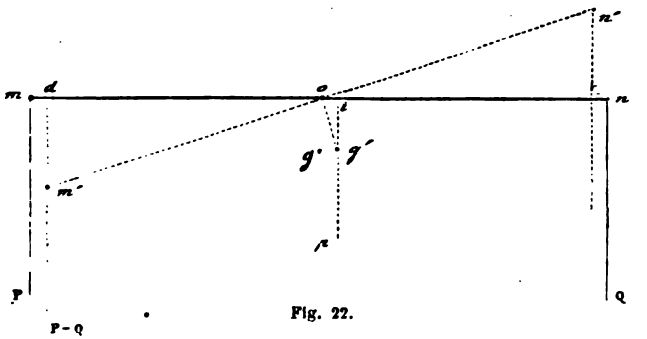


Fig. 22.

dans les plateaux. En effet, P et Q étant ces deux poids, et P plus grand que Q, soient *m*, *o* et *n* les intersections des arêtes des trois prismes par un plan vertical (fig. 22), *p* le poids du fléau, *mn* sa direction horizontale, *g* la position qu'occupe alors son centre de gravité, et *g'* celle qu'occupe ce point quand le fléau est incliné suivant *m'n'*. Ce dernier est alors sollicité en sens contraires par les deux poids P—Q et *p*, dont les moments par rapport au centre d'oscillation *o* sont respectivement (P—Q) × *od* et *p* × *oi*. Or, tandis que les facteurs P—Q et *p* sont des quantités constantes, les facteurs *od* et *oi* varient avec l'inclinaison, *od* décroissant de *om* à zéro, et *oi* croissant de zéro à *og'*; donc il y aura toujours un angle d'inclinaison *mom'*, pour lequel les deux moments seront égaux, ce qui donne l'équilibre (49).

52. **Conditions de sensibilité.**— Une balance est d'autant plus sensible, toutes choses égales d'ailleurs :

1° *Que les bras du fléau sont plus longs.*

En effet, on a vu ci-dessus (51) que la force qui fait incliner le fléau est l'excès de poids P—Q appliqué au bras de levier *od*; mais celui-ci, qui est la projection de *om'* sur *om*, est d'autant plus grand, que le bras du fléau est plus long; donc l'action de P—Q croît avec la longueur du fléau.

2° *Que le poids du fléau est moindre.*

3° *Que le centre de gravité du fléau est plus rapproché de l'axe de suspension.*

Car la résistance qui s'oppose à l'inclinaison du fléau étant son poids p appliqué au bras de levier oi, et oi étant la projection de $og' = og$, plus les quantités p et og seront petites, plus la résistance à l'inclinaison le sera elle-même ; d'où découlent la deuxième et la troisième condition ci-dessus.

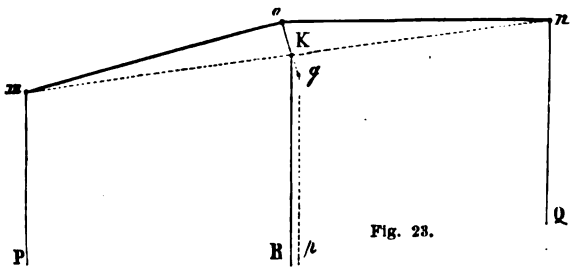


Fig. 23.

4° *Les trois points de suspension des plateaux et du fléau doivent être en ligne droite.*

En effet, soit d'abord le point de suspension o du fléau au-dessus de la droite mn qui joint les points de suspension des plateaux (fig. 23), et soit P plus grand que Q d'une quantité p'. La résultante R des poids P et Q équivalant à $p' + 2Q$, la première partie p' reste appliquée en m, où elle fait incliner le fléau du côté de l'excès de poids, tandis que la deuxième partie $2Q$, appliquée en K milieu de mn, concourt avec le poids p du fléau pour faire osciller celui-ci en sens contraire. La balance perd donc de sa sensibilité.

Dans le cas où le point o est au-dessous de la droite mn (fig. 24), la même décomposition des poids P et Q en $p' + 2Q$ ayant lieu, le poids $2Q$, toujours appliqué en K, agit dans le même sens que le poids p' pour faire incliner le fléau. La balance tend donc à gagner en sensibilité. Cependant cette disposition est à rejeter, parce que la somme des moments de p' et de $2Q$ par rapport au point o étant, en général, plus grande que le moment de p par rapport au même point, la balance serait folle dans le plus grand nombre de cas.

Au contraire, lorsque les points m, o et n sont en ligne droite (fig. 22), le poids $2Q$, appliqué au point o même, est détruit par la résistance de ce point, et le fléau incline par la seule action de l'excès de poids p' appliqué en m. Il est à remarquer qu'alors la

pression exercée en o par la résultante 2Q étant détruite, et p' étant toujours très-petit, *la sensibilité de la balance est indépendante de la grandeur des poids* P et Q, abstraction faite toutefois du frottement du couteau sur la chape, frottement d'autant plus grand, que la balance est plus chargée.

5° *Dans la limite de charge de la balance, le fléau doit être inflexible;* car, s'il fléchit, non-seulement son centre de gravité s'abaisse, mais encore les points de suspension des plateaux.

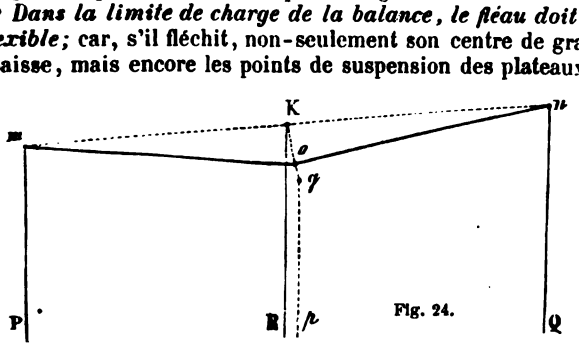


Fig. 24.

6° *Le frottement, aux points d'appui du couteau et aux points de suspension des plateaux, doit être le plus petit possible.* C'est pour obtenir ce résultat que dans les balances de précision (54) on fait usage de chapes bien polies d'agate ou d'acier.

53. Expression algébrique des conditions de sensibilité de la balance. — On peut exprimer par une formule simple les trois premières conditions de sensibilité données dans le paragraphe précédent. Pour cela, soient α l'angle dom' (fig. 22), qui représente l'inclinaison du fléau, et p' la différence P—Q des poids placés dans les plateaux. On a déjà vu (49) que le fléau étant en équilibre dans la position inclinée, on a $p' \times od = p \times oi$ [1]. Or le triangle rectangle dom' donne $od = om' \cos \alpha$, et dans le triangle oig', semblable à dom', comme ayant les côtés homologues perpendiculaires, on a $oi = og' \sin \alpha$. Portant ces valeurs dans l'égalité [1], et remplaçant om' et og' par leurs égales om et og, il vient $\frac{p'}{p} = \frac{og}{om} \tang \alpha$, d'où $\tang \alpha = \frac{p' \times om}{p \times og}$ [2].

Or l'angle α étant assez petit pour qu'on puisse remplacer la tangente α par l'arc α, qui mesure l'inclinaison et, par suite, la sensibilité de la balance, on voit par l'égalité [2] que cette sensibilité est directement proportionnelle à om, et inversement proportionnelle à p et à og, ce qui comprend les trois premières conditions exprimées au paragraphe 52.

* **54. Balance de précision.** — La balance représentée dans la figure 19 est celle employée dans le commerce, auquel elle offre une précision suffisante; mais en physique, en chimie surtout, pour les analyses, on doit faire usage de balances plus précises.

La figure 25 montre une balance de précision construite par M. Deleuil, et sensible à un demi-milligramme. Afin de la garantir des agitations de l'air, on la recouvre d'une cage de verre qui la préserve de la poussière et de l'humidité. La face antérieure s'ouvre à volonté pour opérer les pesées : cette face n'est pas représentée dans le dessin, afin de ne pas en masquer les détails.

Deux montants de fonte A et B supportent à leur sommet chacun un plateau d'agate sur lequel repose, à l'aide d'un prisme d'acier, le fléau *aa*. A chaque extrémité de celui-ci est fixé un prisme d'acier, l'arête en dessus, destiné à supporter une chape d'agate à laquelle est attaché un des plateaux. Si ces prismes restaient en contact avec les plans d'agate, leurs arêtes s'émousseraient, et la balance perdrait de sa sensibilité. C'est pour éviter cet inconvé-

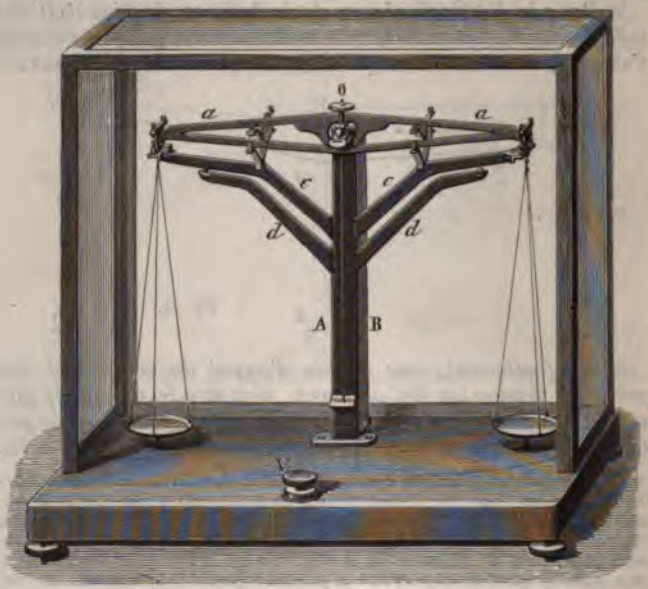


Fig. 25.

nient qu'on adapte aux balances de précision un accessoire important, la *fourchette*, pièce mobile, destinée à soulever les plateaux et le fléau, toutes les fois que la balance ne fonctionne pas.

Les deux bras *d*, *d*, portés par le montant A, sont fixes et ne servent qu'à guider la fourchette. Celle-ci consiste en une pièce de fonte *c c*, aussi longue que le fléau : elle s'élève et s'abaisse à frottement doux le long du montant A, à l'aide d'une tige masquée par ce dernier dans le dessin; mais on verra ci-après le mécanisme qui fait monter et descendre la fourchette (fig. 28).

Pour faire comprendre mieux le jeu de la fourchette, la figure 27 représente, sur une plus grande échelle, le système qui sert à soulever les plateaux, et la figure 26, celui qui sert à soulever le fléau. A l'extrémité du fléau *a* (fig. 27) est un prisme d'acier *i*, et au-dessus de celui-ci une pièce *pq*, qui porte un des plateaux ; dans la face inférieure de cette pièce est encastré un plan d'agate qui s'appuie sur le prisme quand la balance fonctionne. Au-dessous du fléau *a* est le bout de la fourchette *c*, qui porte deux boulons cylindriques *m*, *n*, disposés avec précision au-dessous de deux pièces coniques liées à la chape *pq*. Par suite, lorsque la fourchette monte, les boulons *m* et *n*, entaillés de cavités

convenablement disposées, reçoivent les deux cônes fixés à la pièce *pq*, soulèvent celle-ci et avec elle le plateau, qui se trouve ainsi porté tout entier par la fourchette. En même temps, le même effet se produit identiquement à l'autre extrémité du fléau. Un mécanisme analogue sert à soulever le fléau pour empêcher son couteau de reposer sur la chape. Pour cela, à la partie moyenne de chacun des bras du fléau *aa* sont adaptées deux pièces coniques *r*, *s* (fig. 26), et, exactement au-dessous, sont fixés à la fourchette *c* deux boulons *k*, *h*, portant des cavités destinées à recevoir les cônes *r* et *s*. Par cette disposition, la fourchette ayant déjà soulevé les plateaux, comme on l'a vu ci-dessus, et con-

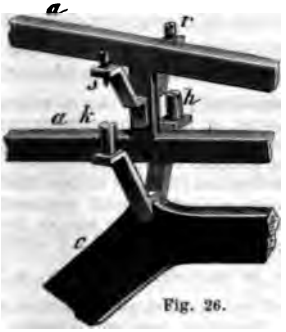


Fig. 26.

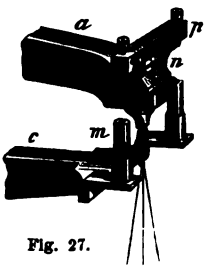


Fig. 27.

tinuant à monter, les boulons *k* et *h* rencontrent les cônes *s*, *r*, et les soulèvent. Le même effet se produisant simultanément en quatre points du fléau, celui-ci est soulevé, et les trois prismes restent sans charge tant que la fourchette est soulevée.

Sur le fléau est un bouton à vis O (fig. 25); son usage est de régler la sensibilité de la balance. En effet, comme il est partie adhérente du fléau, lorsqu'on remonte ce bouton, le centre de gravité de tout le système est relevé, et la sensibilité augmente (52, 3°); l'inverse se produit quand on abaisse le bouton. Si on le relève trop, la balance devient folle.

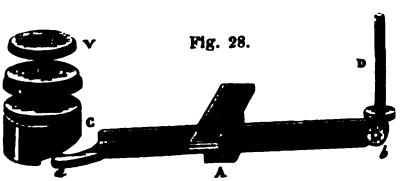


Fig. 28.

La figure 28 représente le mécanisme à l'aide duquel on fait marcher la fourchette. Il se compose d'un levier *ab* placé sous la tablette qui porte la balance. Ce levier, mobile autour d'un axe horizontal A, est articulé d'un bout à une tige D reliée à la fourchette et la faisant marcher; de l'autre, il porte un appendice *a* sur lequel presse une pièce cylindrique C entaillée en hélice à sa base. On fait tourner cette pièce à l'aide d'un bouton V représenté en avant de la balance (fig. 25). Lorsque, en tournant, le bord incliné de la pièce C presse sur l'appendice *a* et l'abaisse, la tige D est soulevée et avec elle la fourchette. En tournant en sens contraire, la tige D s'abaisse et la fourchette de-

55. **Méthode des doubles pesées.** — On doit à Borda, physicien français, mort à Paris en 1799, un procédé qui permet d'obtenir des pesées exactes avec une balance dont les bras sont inégaux. Pour cela, on place le corps dont on veut connaître le poids dans un des plateaux, et on lui fait équilibre, dans l'autre, avec de la grenaille de plomb ou du sable; puis on enlève du premier plateau le corps à peser, et on le remplace par des grammes et des subdivisions de gramme jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse de nouveau. Le poids obtenu ainsi est exactement celui du corps; car, dans cette double pesée, le corps et les grammes agissent tour à tour sur le même bras du fléau pour faire équilibre à la même résistance.

On peut aussi déterminer le poids d'un corps avec précision par la méthode suivante, qui consiste à peser deux fois le corps, en le plaçant successivement dans chacun des plateaux, ce qui revient encore à une double pesée, puis à déduire par le calcul le poids cherché des deux résultats obtenus.

En effet, ayant posé le corps à peser dans l'un des plateaux, et dans l'autre des grammes jusqu'à ce qu'il y ait équilibre, soient x le poids cherché, p le nombre des grammes qui lui font équilibre, et a et b les longueurs des bras de levier correspondant respectivement aux poids x et p. D'après le principe d'équilibre du levier donné plus haut (49), on a $\frac{x}{p}=\frac{b}{a}$, ou $ax=pb$ [1]. De même, si l'on représente par p' le nombre des grammes qui font équilibre au corps après l'avoir changé de plateau, on a $bx=ap'$ [2]. Multipliant membre à membre les égalités [1] et [2], et supprimant le facteur commun ab, on a

$$x^2=pp', \text{ d'où } x=\sqrt{pp'}.$$

Ce qui fait voir que *le poids cherché est moyen proportionnel entre les deux poids p et p'.*

Les deux bras d'une balance n'étant jamais parfaitement égaux, on doit toujours, dans les pesées de précision, faire usage de l'une des deux méthodes ci-dessus. Toutefois cela ne suffit pas pour obtenir rigoureusement le poids d'un corps. En effet, il sera démontré (173) que tout corps pesé dans l'air perd une partie de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace; d'où il résulte que tout poids obtenu par la balance n'est qu'un poids apparent, moindre que le poids réel. On verra (174) comment on déduit, par le calcul, le poids réel du poids apparent.

CHAPITRE III

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS, INTENSITÉ DE LA PESANTEUR, PENDULE

56. **Lois de la chute des corps.** — En négligeant la résistance de l'air, c'est-à-dire en supposant que les corps tombent dans le vide, leur chute est soumise aux trois lois suivantes :

oi. — Tous les corps, dans le vide, tombent également
ette loi se démontre par l'expérience, au moyen d'un tube
re de 2 mètres de longueur environ,
à l'une de ses extrémités et terminé,
re, par un robinet de cuivre. On y in-
: des corps de densités différentes,
emple, du plomb, du liége, du pa-
ne barbe de plume; puis on fait le
vec la machine pneumatique. Retour-
nsuite le tube brusquement, on voit
s corps qu'on y a introduits tomber
ient vite (fig. 29). Mais si, après avoir
ntrer un peu d'air, on renverse de
au le tube, on remarque un faible
pour les corps les plus légers. Enfin,
rd devient très-apparent lorsqu'on a
rentrer tout à fait l'air. Donc si, dans
ditions ordinaires, les corps tombent
ement vite, cela provient unique-
de la résistance de l'air, et non de
la pesanteur s'exerce avec plus d'in-
: sur certaines substances que sur
es. Un corps qui a deux fois plus de
qu'un autre est bien, en réalité, at-
rs la terre par une force double; mais
orce double devant mettre en mouve-
une quantité de matière double, on
36) qu'elle ne peut lui donner que la
accélération de vitesse que reçoit l'au-
ps d'une force deux fois plus petite.
ésistance que l'air oppose à la chute
rps est surtout sensible pour les li-
. Dans l'air, ils se divisent et tombent
ttelettes; dans le vide, ils tombent,
e ferait une masse solide, sans se
. Ce phénomène se démontre avec
teau d'eau. On nomme ainsi un tube
re un peu gros, de 30 à 40 centimè-
: long, rempli d'eau à moitié et fermé
mpe après qu'on en a chassé l'air

Fig. 29 (h = 2 m).

bullition. Lorsqu'on retourne ce tube brusquement, l'eau,
ibant, vient frapper l'extrémité inférieure
:, comme le ferait le choc de deux corps

2e LOI, OU LOI DES ESPACES. — *Les espaces parcourus par un corps qui, partant de l'état de repos, tombe dans le vide, sont proportionnels aux carrés des temps pendant lesquels ils ont été parcourus.* En d'autres termes, dans des temps représentés par 1, 2, 3, 4..... les espaces parcourus le sont respectivement par 1, 4, 9, 16....

3e LOI, OU LOI DES VITESSES. — *La vitesse acquise par un corps qui tombe dans le vide est proportionnelle au temps pendant lequel il est tombé.* C'est-à-dire qu'au bout d'un temps 2, 3, 4 fois plus grand, la vitesse acquise est elle-même 2, 3, 4 fois plus grande.

On va voir ci-après comment la loi des espaces et celle des vitesses se vérifient par l'expérience (57, 58 et 59).

Conséquence. — Puisque, d'après la deuxième loi, l'espace parcouru dans la première seconde étant 1, les espaces parcourus dans 2, 3, 4, 5..., secondes sont 4, 9, 16, 25..., il en résulte que l'espace parcouru dans la deuxième seconde est 4 moins 1, ou 3; dans la troisième seconde, il est 9 moins 4, ou 5; dans la quatrième, 16 moins 9, ou 7, et ainsi de suite; c'est-à-dire que *les espaces parcourus successivement dans la première, la deuxième, la troisième, la quatrième... seconde, sont entre eux comme la suite naturelle des nombres impairs* 1, 3, 5, 7.....

Les lois de la chute des corps ne sont vraies que dans le vide et pour des hauteurs de chute peu considérables. Dans l'air, elles sont modifiées par la résistance que rencontrent les corps; de plus, on verra bientôt qu'à des hauteurs inégales dans l'atmosphère, l'intensité de la pesanteur n'est pas rigoureusement la même (61).

C'est Galilée qui, à la fin du XVIe siècle, découvrit les lois de la pesanteur, et les fit connaître dans ses cours, à l'université de Pise, où il professait les mathématiques.

57. **Plan incliné.** — Les appareils qui servent à démontrer les lois de la chute des corps sont le *plan incliné*, la *machine d'Atwood* et *l'appareil à indications continues* de M. Morin.

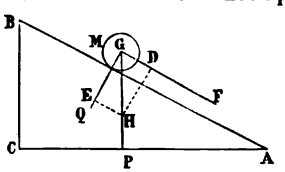


Fig. 30.

On appelle *plan incliné* tout plan qui fait avec un plan horizontal un angle moindre qu'un droit. Plus cet angle est aigu, plus est faible la vitesse d'un corps qui descend le long d'un plan incliné. En effet, représentons par AB (fig. 30) la section d'un plan incliné, par AC celle d'un plan horizontal, et par BC une perpendiculaire abaissée d'un point quelconque B de la ligne AB sur la ligne AC. Un corps quelconque M s'appuyant sur le plan incliné, son poids P pourra être décomposé en deux forces Q et F, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au plan incliné. La première sera détruite par la résistance du plan, et la force F agira seule sur la masse M pour

la faire descendre. Pour calculer la valeur de F, on porte sur GP une longueur GH qui représente le poids P, et l'on achève le parallélogramme DGEH (30); la force F est alors représentée par DG. Or les triangles DGH et ABC sont semblables, comme ayant les angles égaux, ce qui donne $\frac{DG}{GH}=\frac{BC}{AB}$, ou $\frac{F}{P}=\frac{BC}{AB}$.

De cette dernière égalité on conclut que la force F est d'autant plus petite, par rapport à P, que la *hauteur* BC du plan incliné est plus petite par rapport à sa *longueur* AB. On peut donc rendre la force F aussi petite qu'on le veut, et ralentir le mouvement du mobile M de manière à pouvoir compter, sur le plan incliné, les chemins parcourus en une, deux, trois... secondes, et cela sans que les lois du mouvement soient changées, puisque la force F est continue et constante. C'est en opérant ainsi que Galilée a fait voir que les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps; ce qui est la loi des espaces (56, 2°). Or on a vu (35) que lorsque les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir, le mouvement est uniformément accéléré : donc de l'expérience de Galilée on déduit la loi des vitesses (56, 3°).

58. **Machine d'Atwood.** — Les lois de la chute des corps se démontrent encore au moyen de la *machine d'Atwood,* ainsi nommée du nom de son inventeur, professeur de chimie à Cambridge, à la fin du siècle dernier. Cette machine se compose d'une colonne de bois (fig. 31) de $2^m,30$ environ de hauteur. A son sommet est une cage de verre sous laquelle est placée une poulie de cuivre R; sur celle-ci s'enroule un fil de soie assez fin pour que son poids puisse être négligé, et soutenant, à ses deux bouts, deux poids égaux K, K'. L'axe de la poulie, au lieu de reposer sur deux coussinets fixes, s'appuie sur les jantes croisées de quatre roues mobiles. Par cette disposition, l'axe de la poulie transmettant son mouvement aux quatre roues, au lieu d'un frottement de glissement, il se produit un frottement de roulement qui est beaucoup plus doux. Sur le devant de la colonne est fixé un mouvement d'horlogerie H, que règle un pendule à secondes P, au moyen d'un échappement à ancre (fig. 45, page 55). Ce dernier est représenté sur le cadran, au-dessus de la roue de rencontre qui en occupe le centre. Cet échappement oscille avec le pendule, et, en inclinant tantôt à droite, tantôt à gauche, il laisse passer, à chaque oscillation, une dent de la roue de rencontre. L'axe de celle-ci porte, à l'extrémité antérieure, une aiguille qui marque les secondes, et à l'extrémité postérieure, derrière le cadran, un excentrique *e* (fig. 32), qui tourne avec l'aiguille dans le sens de la flèche. Cet excentrique, en appuyant sur le levier *ba*, fait basculer un plateau *n* sur lequel se place le corps dont on veut observer la chute. Pour cela, à l'axe horizontal qui porte le plateau *n* est fixé un taquet *i*, qui s'appuie sur le bout supérieur du levier *ab*. Tant que ce levier n'est pas chassé par l'excentrique, le taquet est maintenu et avec lui le plateau *n*; mais à l'instant où l'extrémité *a* du levier, en inclinant à droite, abandonne le taquet, le plateau *n* basct ls qu'il

soutenait tombe. Le système est réglé de façon que la chute commence au moment précis où l'aiguille du cadran H arrive au zéro de la graduation.

Enfin, parallèlement à la colonne est une échelle de bois divisée en centimètres, et destinée à mesurer les espaces parcourus par le corps qui tombe. Sur cette échelle sont deux *curseurs*, c'est-à-dire deux pièces mobiles qui, à l'aide de vis de pression, peuvent se placer à telle hauteur qu'on veut. Ces curseurs sont représentés dans différentes positions, sur la droite de la machine, dans les figures 32 à 37. L'un d'eux A (fig. 32 à 34) porte un disque plein, qui sert à arrêter, à un moment donné de sa chute, le corps qui tombe; l'autre B (fig. 35 à 37) porte un anneau, qui se laisse traverser par le corps qui tombe, mais arrête au passage un poids additionnel m qu'on place sur ce corps, et qui consiste en une lame de laiton plus longue que le diamètre intérieur de l'anneau. La figure 38 représente sur une plus grande échelle le poids additionnel m et le poids K sur lequel il se place. Dans la figure 31, les poids K, K′ se font équilibre, et ce n'est qu'en vertu de l'excès de poids m qu'on pose sur le premier, que l'équilibre est rompu et que la chute du poids K est déterminée.

La machine d'Atwood donne le moyen de ralentir la vitesse de chute, et de faire succéder, à volonté, un mouvement uniforme à un mouvement accéléré.

Pour apprécier comment cette machine peut ralentir le mouvement, supposons que la petite plaque de laiton m tombe d'abord seule, et représentons par m' sa masse et par g sa vitesse au bout d'une seconde; d'où sa quantité de mouvement est $m'g$ (36). Si maintenant on place la plaque m sur le poids K, elle ne peut tomber qu'en communiquant une partie de sa vitesse aux deux poids K et K′, puisque ceux-ci se faisant équilibre, la pesanteur est sur eux sans effet. Par conséquent, c'est la même force qui faisait tomber le poids m, quand il était seul, qui maintenant va mouvoir ce poids et les deux poids K et K′. La quantité de mouvement sera donc la même (36). Or, si l'on représente par x la vitesse au bout d'une seconde, et par M la masse de chacun des poids K, K′, la quantité de mouvement est maintenant $(m'+2M)x$. L'égalant à celle de la masse m' lorsqu'elle tombait seule, on a $(m'+2M)x=gm'$; d'où $x=\frac{gm'}{m'+2M}$. Si l'on suppose, par exemple, que les poids K et K′ soient chacun 16, le poids m étant 1, on trouve $x=\frac{g}{33}$; c'est-à-dire que la vitesse est 33 fois plus petite que si le corps tombait librement dans l'air, ce qui permet de le suivre dans sa chute, et rend la résistance de l'air négligeable.

Les diverses pièces de la machine étant connues, proposons-nous d'abord de démontrer que *les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps*. Pour cela, le pendule P étant arrêté et l'aiguille du cadran hors du zéro, on place le poids additionnel m sur le poids K, et l'on pose celui-ci ainsi chargé sur le plateau n

Fig. 31.

Fig. 32.

Fig. 33.

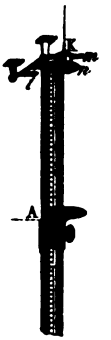


Fig. 34.

Fig. 35.

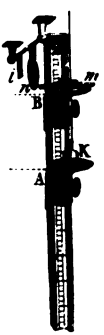


Fig. 36.

Fig. 37.

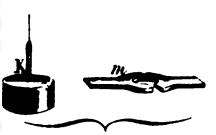


Fig. 38.

(fig. 32), maintenu horizontalement par le levier *ab*, et correspondant au zéro de l'échelle. Ne faisant alors usage que du curseur plein A, on le place par tâtonnement à une distance telle du zéro de l'échelle, que les deux poids K et *m* mettent 1 seconde à tomber de *o* en A, lorsqu'on met le pendule en mouvement et que l'excentrique fait basculer le plateau (fig. 33).

Admettons qu'on ait ainsi trouvé que la hauteur de chute, en 1 seconde, soit 7. Recommençant alors l'expérience de la même manière, mais en abaissant le curseur à une distance quatre fois plus grande, c'est-à-dire à la 28e division de l'échelle (fig. 34), on observe que cet espace est parcouru juste en 2 secondes par les deux poids K et *m*. On trouve de même qu'une hauteur neuf fois plus grande, ou de 63 divisions, est parcourue en 3 secondes, et ainsi de suite : la loi des espaces est donc vérifiée.

Il reste à vérifier que *les vitesses croissent proportionnellement aux temps*. Pour cela, il faut se rappeler que, dans le mouvement accéléré, on entend par vitesse, en un moment donné, celle du mouvement uniforme qui succède au mouvement accéléré (35). Par conséquent, pour constater suivant quelle loi varie la vitesse d'un corps qui tombe, il suffit de mesurer la vitesse du mouvement uniforme qui succède au mouvement accéléré, successivement après une, deux, trois... secondes de chute.

La substitution du mouvement uniforme au mouvement accéléré s'obtient au moyen du curseur annulaire B. Pour cela, on commence par placer celui-ci à une distance telle (fig. 35), que les deux poids K et *m*, réunis, mettent, à tomber jusqu'en B, 1 seconde, comme dans la première expérience ; puis le poids additionnel *m* étant alors arrêté par le curseur B (fig. 36), et le poids K continuant seul à descendre, on place le curseur plein A au-dessous de B, à l'intervalle convenable pour que le poids K mette 1 seconde à descendre d'un curseur à l'autre. Or, de *o* en B, le mouvement est uniformément accéléré, tandis que de B en A il est uniforme ; car le petit poids *m* étant arrêté par le curseur annulaire, la pesanteur n'agit plus de B en A, et le mouvement ne se continue qu'en vertu de l'inertie. Le nombre des divisions de l'échelle parcourues en une seconde par le poids K, d'un curseur à l'autre, représente donc la vitesse acquise par les deux poids K et *m* au bout d'une seconde de chute (35).

Recommençant alors l'expérience, on descend le curseur annulaire B à une distance quatre fois plus grande que la première fois (fig. 37), en sorte que les deux poids K et *m* mettent 2 secondes à tomber de *o* en B, d'après la seconde loi (56) ; puis on fixe le curseur plein A à une distance du curseur B double de celle qui

les séparait tout à l'heure. Or, les deux points K et *m* mettant maintenant 2 secondes à parcourir la distance *o*B, d'un mouvement uniformément accéléré, on observe que le poids K descend, seul, en 1 seconde, de B à A. Donc, puisque la distance BA est maintenant double de ce qu'elle était d'abord, la vitesse acquise au bout de 2 secondes est double de celle acquise après 1 seconde. On constate de même qu'après 3, 4, 5 secondes de chute, cette vitesse est 3, 4, 5 fois plus grande; donc la troisième loi est vérifiée.

59. **Appareil à indications continues de Morin.** — Le principe de cet appareil, dont l'idée première est due à Poncelet, est que le corps tombant trace lui-même, sur un cylindre tournant, le chemin parcouru. La figure 39 en montre une vue d'ensemble, et la figure 40 en donne les détails. L'appareil se compose d'un bâti de bois de 2 mètres de hauteur, qui sert à maintenir verticalement un cylindre de bois M, très-léger et pouvant tourner librement autour de son axe. Ce cylindre est recouvert d'un papier divisé en carrés égaux par des lignes horizontales et verticales équidistantes. Ces dernières servent à mesurer le chemin parcouru par le corps qui tombe le long du cylindre, et les lignes horizontales à partager en parties égales la durée de la chute.

Le corps qui tombe est une masse de fonte P, portant un crayon *i* pressé contre le papier par un petit ressort. Dans sa chute, cette masse est guidée par deux fils de fer bien tendus qui passent dans des oreilles sur les deux côtés. A sa partie supérieure, la même masse porte un mentonnet qui s'appuie sur l'extrémité d'un levier coudé AC. Par suite, en tirant sur un cordeau K attaché au levier, celui-ci lâche le mentonnet, et la masse P tombe. Si le cylindre M était fixe, le crayon tracerait sur le papier une ligne droite qui serait une génératrice du cylindre; mais si ce dernier tourne d'un mouvement uniforme, le crayon trace une courbe *mn*, qui sert à constater la loi de la chute.

Quant à la rotation du cylindre, elle s'obtient à l'aide d'un poids Q suspendu à une corde qui s'enroule sur un treuil G. L'axe de celui-ci porte à un bout une roue dentée *c* qui mène deux vis sans fin *a* et *b*, dont la première fait tourner le cylindre et l'autre deux *ailettes x x'*. A l'autre bout du treuil est une roue à rochet *o* dans les dents de laquelle s'engage l'extrémité d'un rochet B, qui empêche le treuil et tout le système de tourner. Mais en tirant sur un cordeau H attaché au rochet, la roue *o* devient libre, le poids Q descend et tout le système se met à tourner. Le mouvement est d'abord accéléré; mais l'air présentant aux aile[illegible] résistance d'autant plus grande que la rotation est plus [illegible] résistance finit par égaler l'accélération que tend à [illegible]an-

teur. A partir de ce moment, le mouvement devient uniforme, c qui arrive quand le poids Q a parcouru environ les trois quarts d sa course. C'est alors que, tirant sur le cordeau K, on fait tom ber la masse P, et que le crayon trace la courbe *mn*.

Fig. 39 (h=2m20).

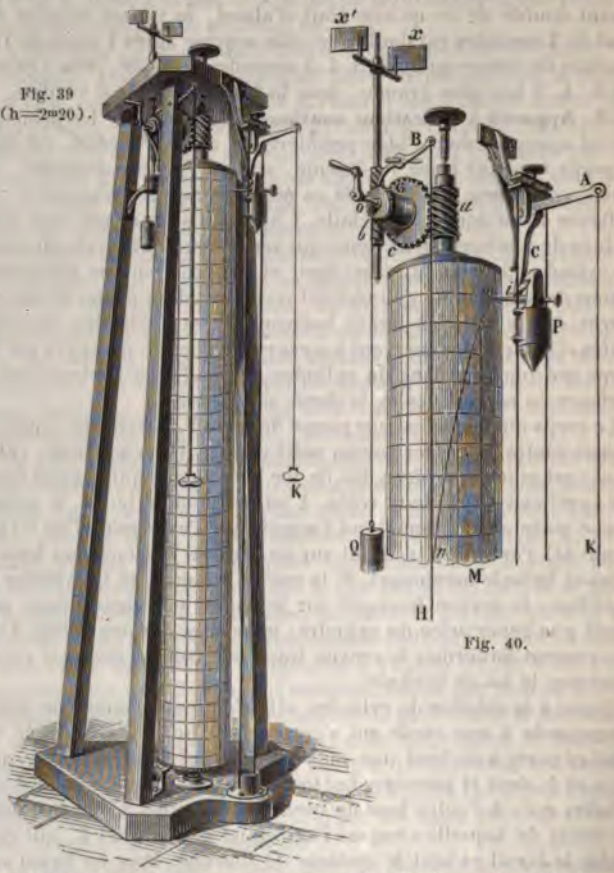


Fig. 40.

Si l'on enlève alors la feuille de papier de dessus le cylindre, e qu'on la développe sur un plan, on obtient la figure 41, dans laquell les longueurs M*a*, M*a'*, M*a''*, M*a'''*.... représentant des intervalle de temps 1, 2, 3, 4...., les droites *ac*, *a'c'*, *a''c''*, *a'''c'''*...., repré *sentent les espaces* parcourus respectivement dans ces intervalle

par le corps qui tombe. Or, si l'on prend la distance ac pour unité, c'est-à-dire si on la suppose égale à 1, on trouve que $a'c'$ vaut 4, $a''c''$ 9, $a'''c'''$ 16; ce qui vérifie que les espaces ac, $a'c'$, $a''c''$...., croissent comme les carrés des temps Ma, Ma', Ma''....

La relation en vertu de laquelle, en un point quelconque c''' de la courbe MN, la distance $a'''c'''$, ou Mp, est proportionnelle

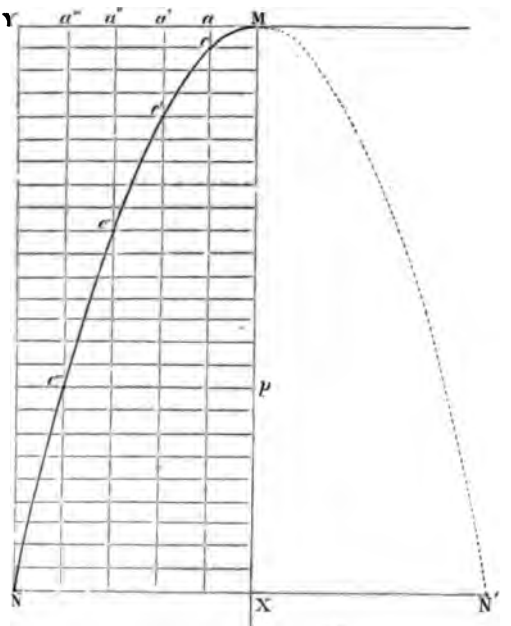


Fig. 41.

au carré de Ma''', ou de pc''', fait voir que cette courbe est une branche de la courbe NMN' connue en géométrie sous le nom de *parabole*. Le point M en est le sommet, et la droite MX l'axe.

60. **Formules relatives à la chute des corps.** — La chute des corps dans le vide s'effectuant suivant un mouvement uniformément accéléré, dans les limites du moins où la pesanteur peut être regardée comme constante (61), les formules trouvées plus haut (35) pour ce mouvement s'appliquent aussi à la chute des corps dans le vide. Seulement toutes les fois qu'il s'agit de la pesanteur, on est convenu de représenter l'accélération de vitesse par seconde par g. Les formules s'écrivent donc alors sous les formes $v=gt$ [1], et $e=\frac{1}{2}gt^2$ [2], qui correspondent respectivement à la troisième et à la deuxième l[illegible] des corps (56).

Si, dans la formule [2], on fait $t=1$, il vient $e=\frac{1}{2}g$; d'où $g=2e$. C'est-à-dire que *la vitesse acquise au bout de l'unité de temps est double de l'espace parcouru dans le même temps.*

Dans l'égalité [1], la vitesse v est exprimée en fonction du temps; mais on peut aussi l'exprimer en fonction de l'espace parcouru, en éliminant t entre les égalités [1] et [2]. Pour cela, on tire de la première $t=\frac{v}{g}$, d'où $t^2=\frac{v^2}{g^2}$. Portant cette valeur de t^2 dans l'égalité [2], on a $e=\frac{1}{2}g\times\frac{v^2}{g^2}$, ou $e=\frac{v^2}{2g}$, en supprimant le facteur commun g. Multipliant par $2g$ les deux membres de cette égalité, il vient $v^2=2ge$; si l'on extrait la racine, on a enfin $v=\sqrt{2ge}$ [3].

Cette formule se déduit de la formule $v=\sqrt{2ae}$ du paragraphe 35, en y remplaçant a par g; on en conclut que *lorsqu'un corps tombe dans le vide, la vitesse acquise en un instant donné est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de chute.*

61. **Causes qui modifient l'intensité de la pesanteur.** — Trois causes font varier l'intensité de la pesanteur : la distance au centre de la terre, l'aplatissement de celle-ci aux pôles, et la force centrifuge.

1° L'attraction terrestre s'exerçant comme si toute la masse du globe était condensée à son centre, et cette traction agissant en raison inverse du carré de la distance (41 et 42), il en résulte que l'intensité de la pesanteur croît ou décroît, quand les corps s'approchent ou s'écartent de la terre. Toutefois cette variation n'est pas apparente dans les phénomènes qui s'observent à la surface de notre globe, parce que son rayon moyen étant de 6 367 400 mètres, l'intensité de la pesanteur reste sensiblement la même lorsqu'un corps s'élève ou s'abaisse de quelques dizaines de mètres. Mais, pour des hauteurs plus considérables, la pesanteur ne peut plus être regardée comme constante. Les lois de la chute des corps énoncées au paragraphe 56 ne doivent donc être admises que pour les corps qui tombent d'une faible hauteur.

Si un corps tombait d'une grande hauteur vers la terre, jusqu'à la surface de celle-ci, la pesanteur agirait toujours sur le corps en raison inverse du carré de la distance au centre; mais si c'est à partir de la surface de la terre qu'on suppose qu'un corps tombe, le calcul fait voir que la loi n'est plus la même, et que si la terre était parfaitement homogène, l'intensité de la pesanteur serait alors *directement proportionnelle* à la distance au centre, ce qui résulte de la portion de la masse terrestre que le corps laisse au-dessus de lui en tombant. Toutefois ce résultat de la théorie ne se vérifie pas par l'expérience dans les puits très-profonds qui servent à l'exploitation des mines, ce qu'on explique parce que la densité des couches superficielles du globe est beaucoup moindre que celle des couches situées à une plus grande profondeur.

2° L'intensité de la pesanteur varie encore avec la latitude, à

se de l'aplatissement de la terre à ses deux pôles; car, vers ces nts, les corps sont plus rapprochés du centre du sphéroïde terre, et par conséquent plus attirés.

° La troisième cause qui modifie l'intensité de la pesanteur est *orce centrifuge*. On nomme ainsi une force à laquelle donne ssance le mouvement circulaire, et en vertu de laquelle les sses animées de ce mouvement tendent à s'éloigner de l'axe rotation. On démontre, en mécanique, que la force centrifuge proportionnelle au carré de la vitesse de rotation; donc, sous même méridien, cette force croît à mesure qu'on approche de quateur, où elle atteint son maximum, puisque c'est là qu'a lieu plus grande vitesse. Au pôle, la force centrifuge est nulle.

Sous l'équateur, la force centrifuge est directement opposée à pesanteur et égale $\frac{1}{289}$ de son intensité. Or 289 étant le carré de , si le mouvement de rotation de la terre était 17 fois plus rale, la force centrifuge, qui est proportionnelle au carré de la esse, serait, sous l'équateur, 289 fois plus intense qu'elle ne st, c'est-à-dire égale à la pesanteur, et les corps ne pèseraient s; pour un mouvement de rotation plus rapide, ils seraient lan- dans l'espace par l'effet de la force centrifuge.

Quand on avance de l'équateur vers les pôles, la pesanteur est moins en moins affaiblie par l'effet de force centrifuge : d'abord, parce que te dernière force décroît dans le même ns; ensuite, parce que, sous l'équateur, e est directement opposée à la pesanr, tandis qu'en avançant vers les pôles, direction devient de plus en plus innée par rapport à celle de la pesanteur. est ce que montre la figure 42, dans laelle PP' représente l'axe de rotation de terre, et EE' l'équateur terrestre. En point quelconque E de ce cercle, la force centrifuge est diée suivant CE, et agit tout entière pour diminuer l'intensité de pesanteur; mais en un point *a*, plus rapproché du pôle, la force ntrifuge étant représentée par une droite *ab* perpendiculaire à xe PP', tandis que la pesanteur agit suivant *a*C, on voit que la santeur n'est plus directement opposée à la force centrifuge, ais seulement à sa composante *ad*, qui est d'autant plus petite r rapport à *ab*, que le point *a* est plus près du pôle.

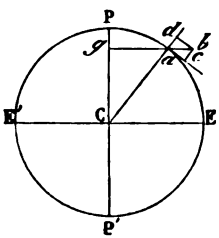


Fig. 42.

62. **Mesure de l'intensité de la pesanteur.** — D'après ce qui précède, la pesanteur pouvant être considérée, dans un m[illegible] et pour des hauteurs de chute peu considérables, comm

accélératrice constante, on prend pour mesure de son intensité la vitesse qu'elle imprime, en une seconde, aux corps qui tombent dans le vide, sans avoir égard à la masse, puisque, dans le vide, tous les corps tombent également vite (56).

Cette vitesse se représente par g. Elle croît de l'équateur au pôle : à Paris, d'après Borda et Cassini, elle est de $9^m,8088$; à l'équateur elle n'est que de $9^m,7800$. On verra bientôt comment elle se détermine, en chaque lieu, à l'aide du pendule (67).

Les variations d'intensité que subit la pesanteur avec la latitude ou l'altitude modifient le poids absolu des corps (45), mais ne changent rien à leur poids relatif, c'est-à-dire à celui que donne la balance. En effet, l'action de la pesanteur s'exerçant également sur toutes les substances, l'augmentation ou la diminution de poids qui résulte des variations de cette force est la même, en chaque lieu, pour les corps à peser et pour les poids métriques ou autres dont on fait usage. En un mot, le nombre de grammes qui représente le poids d'un corps à Paris, le représente aussi au pôle ou à l'équateur. Ce qui varie, c'est le poids du gramme, qui croît ou décroît proportionnellement à l'intensité de la pesanteur.

63. **Pendule.** — On distingue deux sortes de pendules : le *pendule simple* et le *pendule composé*. Le *pendule simple* est celui qui serait formé d'un point matériel pesant, suspendu par un fil inextensible, sans masse et sans poids, à un point fixe autour duquel il pourrait librement *osciller*, c'est-à-dire prendre un mouvement de va-et-vient plus ou moins rapide. Ce pendule ne peut se réaliser; il est purement théorique, et ne sert qu'à déterminer par le calcul les lois des oscillations du pendule.

On nomme *pendule composé* tout corps qui peut osciller autour d'un point ou d'un axe fixe. Quand le pendule oscille autour d'un point, celui-ci prend le nom de *centre de suspension;* si le mouvement a lieu autour d'une droite horizontale, cette droite est appelée *axe de suspension*. Le pendule composé est le seul qu'on puisse construire. Sa forme peut varier à l'infini; mais, en général, il consiste en une masse métallique, lenticulaire ou sphérique, suspendue à une tige mobile autour d'un axe horizontal: tels sont les balanciers d'horloge; tel est le pendule P (fig. 31).

Les pendules composés sont suspendus, soit à l'aide d'un couteau analogue à celui des balances (fig. 21), soit à l'aide d'une lame d'acier, mince et flexible, qui se courbe légèrement à chaque oscillation (fig. 45).

Pour nous rendre compte du mouvement oscillatoire du pendule, considérons d'abord un pendule simple cM, dont M soit le point matériel, et o le centre de suspension (fig. 43). Lorsque le

point M se trouve au-dessous du point *c*, sur la verticale passant par ce point, l'action de la pesanteur est détruite; mais si le point M est transporté en *m*, son poids P se décompose en deux forces : l'une dirigée suivant le prolongement *m*B du fil, l'autre suivant la tangente *m*D à l'arc *m*M*n*. La composante *m*B est détruite par la résistance du point *c*, tandis que la composante *m*D sollicite le point matériel à descendre de *m* en M. Arrivé en ce dernier point, le pendule ne s'arrête pas; car, en vertu de son inertie, il est entraîné dans la direction M*n*.

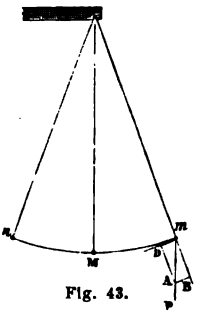


Fig. 43.

Or, si l'on répète, en un point quelconque de l'arc M*n*, la même construction qu'en *m*, on reconnaît que la pesanteur qui, de *m* en M, a agi comme force accélératrice, agit, de M en *n*, comme force retardatrice. Elle enlève donc successivement au mobile la vitesse acquise pendant la descente; cette force doit donc diminuer la vitesse exactement de la même quantité dont elle l'a augmentée de *m* en M, en sorte qu'elle l'aura entièrement détruite lorsque le pendule se sera élevé en *n*, au-dessus de la position M, à la même hauteur que le point *m*. Le pendule revenant alors de *n* vers M, la même série de phénomènes se reproduit, et le pendule tend ainsi à osciller éternellement, en décrivant des arcs égaux des deux côtés du point M. Mais, dans les expériences, il n'en est jamais ainsi, deux causes contribuant sans cesse à ralentir le mouvement et même à le détruire : la première est la résistance du milieu dans lequel le pendule se meut; la seconde est le frottement qui se produit sur l'axe de suspension.

64. **Lois des oscillations du pendule.** — On nomme *oscillation* le passage du pendule d'une position extrême *m* à l'autre position extrême *n*. L'arc *mn* est l'*amplitude* d'oscillation. Enfin, la *longueur* du pendule simple est la distance du point de suspension *c* au point matériel M.

On démontre, en mécanique, que les oscillations du pendule simple, dans le vide, sont soumises aux quatre lois suivantes :

1° *Pour un même pendule, les petites oscillations sont isochrones.* C'est-à-dire qu'elles se font très-sensiblement en temps égaux, tant que leur amplitude ne dépasse pas 2 à 3 degrés. L'isochronisme des petites oscillations du pendule persiste dans l'air comme dans le vide. En effet, le calcul fait voir que la résistance de l'air, augmentant la durée de la demi-oscillation descendante, diminue d'une quantité égale celle de la demi-oscillati

dante, en réduisant son amplitude. Mais, si l'air ne trouble pa l'isochronisme des petites oscillations par sa résistance, il en aug mente la durée par la perte de poids que subit le pendule dan l'air (173); car, par cette perte de poids, la force qui sollicite l pendule à osciller est moindre.

C'est Galilée qui, le premier, constata l'isochronisme des pe tites oscillations du pendule. On rapporte qu'il fit cette décou verte, jeune encore, en observant les mouvements d'une lamp suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise.

2° *Pour des pendules de même longueur, la durée des oscil lations est la même, quelle que soit la substance dont le pen dule est formé.* C'est-à-dire que des pendules de fer, de plomb, d cuivre, exécutent le même nombre d'oscillations dans le mêm temps, s'ils sont d'égale longueur.

3° *Pour des pendules inégaux, la durée des oscillations e proportionnelle à la racine carrée de la longueur.* C'est-à-dir que la longueur devenant 4, 9, 16... fois plus grande, la duré des oscillations l'est seulement 2, 3, 4... fois davantage.

4° *Sous des latitudes différentes, ou à des altitudes inégales la durée des oscillations, pour des pendules de même longueu est en raison inverse de la racine carrée de l'intensité de l pesanteur.*

Ces lois découlent de la formule $t=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, à laquelle on est conduit en a pliquant le calcul au mouvement du pendule simple. Dans cette formule, t repr sente la durée d'une oscillation; l, la longueur du pendule; g, l'intensité de pesanteur, c'est-à-dire la vitesse acquise, au bout d'une seconde, par un cor qui tombe dans le vide (62). Quant à π, c'est une quantité constante qui repr sente le rapport de la circonférence au diamètre, et qui égale 3,141592.

Les deux premières lois du pendule se déduisent immédiatement de la fo mule $t=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$; car cette formule ne contenant ni l'amplitude de l'oscil tion, ni la densité de la substance dont le pendule est formé, la valeur de est indépendante de ces deux quantités.

Pour en déduire la troisième loi, considérons un second pendule dont la lo gueur soit l' et la durée des oscillations t'. D'après la formule ci-dessus, on $t'=\pi\sqrt{\frac{l'}{g}}$. Or ces deux formules peuvent s'écrire sous la forme

$$t=\pi\frac{\sqrt{l}}{\sqrt{g}}, \quad \text{et} \quad t'=\pi\frac{\sqrt{l'}}{\sqrt{g}}.$$

En les divisant membre à membre, et supprimant les facteurs communs π e $\sqrt{g}$, on a $\frac{t}{t'}=\frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l'}}$, formule qui est l'expression de la troisième loi ci-dessus.

De même, pour la quatrième loi, soient g, g' les intensités de la pesanteur e deux lieux différents, et t, t' les durées des oscillations d'un même pendule e

x lieux, on a $t=\pi\frac{\sqrt{l}}{\sqrt{g}}$, et $t'=\pi\frac{\sqrt{l}}{\sqrt{g'}}$. Divisant membre à membre, on

$\frac{t}{t'}=\frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{g}}$, formule qui est bien l'expression de la quatrième loi.

evant au carré les deux membres de cette dernière égalité, on a $\frac{g'}{g}=\frac{t^2}{t'^2}$;

lire que la quatrième loi peut encore s'énoncer en disant que, *pour un* ndule, *dans deux lieux différents, l'intensité de la pesanteur est en raison du carré de la durée des oscillations.*

Longueur du pendule composé. — Les lois et la formule ius s'appliquent aussi au pendule composé; mais alors il faut ce qu'on entend par sa *longueur*. Pour cela, observons que endule composé étant formé d'une tige pesante terminée e masse plus ou moins considérable, les divers points ma- de ce système tendent, d'après la troisième loi du pendule, ire leurs oscillations dans des temps d'autant plus longs, ont plus éloignés du point de suspension. Or tous ces points nvariablement liés entre eux, leurs oscillations se font né- ement dans le même temps. Par suite le mouvement des les plus rapprochés de l'axe de suspension se trouve re- tandis que celui des plus éloignés est accéléré. Entre ces ositions extrêmes, il y a donc des points qui ne sont ni ac- ni retardés, et qui oscillent comme s'ils n'étaient pas liés le du système. Ces points étant équidistants de l'axe de sus- n, leur ensemble constitue un *axe d'oscillation* parallèle mier. C'est la distance de l'axe de suspension à l'axe d'oscil- qu'on nomme *longueur du pendule composé*. En d'autres , *la longueur d'un pendule composé est celle du pendule qui ferait ses oscillations dans le même temps.*

e d'oscillation jouit de la propriété d'être réciproque de e suspension : c'est-à-dire qu'en suspendant le pendule par e d'oscillation, la durée des oscillations reste la même, ce ontre que la longueur n'a pas changé. Cette propriété, dé- ée pour la première fois par Huyghens, physicien hollandais, le moyen de trouver expérimentalement la longueur du pen- omposé. Pour cela, on retourne le pendule et on le suspend yen d'un axe mobile, qu'on place, après quelques tâtonne- , en un point tel, que le nombre des oscillations, dans le temps, soit le même qu'avant le retournement. Ce résultat , la longueur cherchée est la distance du deuxième axe de nsion au premier. Si l'on substitue alors la valeur obtenue à la place de l, dans la formule du pendule simple, celle-ci t applicable au pendule composé, et les lois des oscilla- ont les mêmes que pour le pendule simple.

La longueur du pendule qui *bat la seconde*, c'est-à-dire qui fait ses oscillations en une seconde, varie avec l'intensité de la pesanteur; elle est :

Sous l'équateur	0m,991033
A Paris.	0m,993866
Au pôle	0m,996671

66. **Vérification des lois du pendule.** — On ne peut vérifier les lois du pendule simple qu'au moyen du pendule composé, en ayant soin de construire celui-ci de manière qu'il atteigne, autant que possible, les conditions du premier. Pour cela, on suspend à l'extrémité d'un fil fin une petite sphère d'une substance très-dense, par exemple, de plomb ou de platine. Le pendule ainsi formé oscille sensiblement comme le pendule simple dont la longueur serait égale à la distance du centre de la petite sphère au point de suspension.

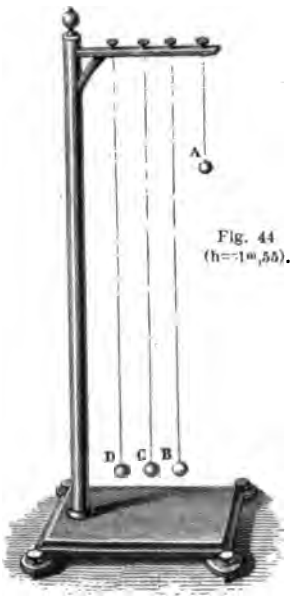


Fig. 44 (h=1m,55).

Pour vérifier la loi de l'isochronisme des petites oscillations, on fait osciller le pendule ainsi construit, et l'on compte le nombre d'oscillations qu'il exécute, en temps égaux, lorsque l'amplitude est successivement de 3, 2 ou 1 degré environ. On observe ainsi que le nombre des oscillations est constant, et par suite leur durée.

Pour démontrer la seconde loi, on prend plusieurs pendules B, C, D (fig. 44), construits de la même manière que le précédent, ayant tous des longueurs égales, et terminés par des sphères de même diamètre, mais de substances différentes, par exemple, de plomb, de cuivre, d'ivoire. Or on observe qu'en négligeant la résistance de l'air, tous ces pendules font, dans le même temps, le même nombre d'oscillations; d'où l'on conclut que la pesanteur agit sur toutes les substances avec la même intensité, ce qu'on a déjà constaté (56).

On vérifie la troisième loi en faisant osciller des pendules dont les longueurs sont respectivement 1. 4. 9.... et l'on trouve que

les nombres d'oscillations correspondants sont comme 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$..., ce qui montre que leur durée est successivement 1, 2, 3...

La quatrième loi ne peut se vérifier qu'en se déplaçant à la surface de la terre, pour se rapprocher ou s'écarter de l'équateur.

67. **Usages du pendule.** — Le pendule sert à constater, ainsi qu'on vient de le voir ci-dessus, que la pesanteur sollicite tous les corps avec la même intensité. Il a servi encore à déterminer l'intensité de la pesanteur sur les différents points de notre globe, la masse des montagnes et la densité de la terre. L'isochronisme de ses oscillations l'a fait appliquer comme régulateur aux horloges. Enfin, Foucault l'a fait servir à la démonstration expérimentale du mouvement de rotation diurne de la terre.

Pour mesurer l'intensité de la pesanteur (62) à l'aide du pendule, on résout l'équation $t=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ (64), par rapport à g. En élevant les deux membres au carré, on trouve $t^2=\pi^2\frac{l}{g}$; d'où l'on tire $g=\frac{\pi^2 l}{t^2}$. Donc, pour connaître g, il faut commencer par mesurer la longueur l d'un pendule composé (65), puis mesurer la durée t de ses oscillations; ce qui s'obtient en cherchant combien il fait d'oscillations dans un nombre de secondes connu, et en divisant ce dernier nombre par le nombre d'oscillations.

C'est en opérant ainsi qu'on a déterminé la valeur de g en différents points du globe, et que Borda et Cassini ont trouvé qu'elle est, à Paris, de $9^m,8088$. Mais en tenant compte de ce que la perte de poids d'un corps dans l'air est plus grande quand le corps est en mouvement que lorsqu'il est en repos, et en faisant subir au mouvement du pendule la correction que cette inégale perte de poids nécessite, Bessel a trouvé que la vraie valeur de g, à Paris, est de $9^m,8096$.

Une fois la valeur de g connue en chaque lieu, on en déduit, par le calcul, la distance au centre de la terre, et, par suite, la forme de celle-ci.

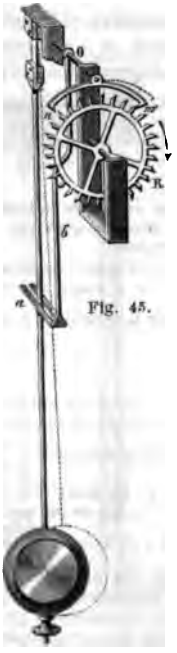


Fig. 45.

C'est Huyghens qui, le premier, appliqua le pendule comme régulateur aux horloges, en 1657, et le ressort spiral aux montres, en 1665. La figure 45 montre le mécanisme à l'aide duquel le pendule sert à régler la marche des horloges et des pendules d'appartement. Sa tige s'engage dans une fourchette a destinée à transmettre le mouvement à une seconde tige b, laquelle est liée à un axe horizontal o. A cet axe est fixée une pièce mn qu'on nomme *échappement à ancre*, à cause de sa forme, et qui se termine à ses extrémités par deux palettes alternativement en prise

avec les dents d'une roue R, qui est dite la *roue de rencontre*. Cette roue, sollicitée par le moteur qui fait marcher l'horloge, tend à prendre un mouvement de rotation continu dans le sens marqué par la flèche. Si le pendule est au repos, la roue est arrêtée par la palette *m*, et avec elle tout le mouvement d'horlogerie. Au contraire, si le pendule oscille et prend la position indiquée en ligne ponctuée, la dent qui butait contre la palette échappe, et la roue tourne, mais d'une demi-dent seulement, parce que l'arc *mn* inclinant en sens contraire, la palette *n* vient à son tour arrêter une dent. Puis, à l'oscillation suivante, cette dent échappe, et c'est la palette *m* qui arrête alors la dent qui vient après celle qu'elle arrêtait d'abord, et ainsi de suite; en sorte qu'à chaque oscillation double du pendule, la roue de rencontre avance d'une dent. Or les oscillations du pendule étant isochrones, la roue de rencontre et le mécanisme de l'horloge, qui en est solidaire, marchent et s'arrêtent à des intervalles égaux, et, par conséquent, indiquent des divisions égales du temps.

68. **Problèmes sur la pesanteur.** — I. Un corps tombant librement dans le vide, quelle sera sa vitesse, à Paris, après 45 secondes de chute.

Cette question se résout à l'aide de la formule $v = gt$ (60), en y faisant $g = 9^m,8088$ (62), et $t = 45^s$; ce qui donne

$$v = 9^m,8088 \times 45 = 441^m,396.$$

A une autre latitude que celle de Paris, la valeur de g n'étant plus $9^m,8088$, la vitesse acquise par le corps qui tombe serait plus grande ou plus petite que $441^m,396$.

II. Pendant combien de temps doit tomber un corps, dans le vide, pour acquérir, à Paris, une vitesse de 600 mètres, qui est celle d'un boulet de canon?

De la formule $v = gt$, on tire $t = \frac{v}{g}$, d'où remplaçant g et v par leurs valeurs,

$$\text{On a } t = \frac{600}{9,8088} = 61^s,16.$$

III. Quel est le temps nécessaire à un corps pour tomber, dans le vide, d'une hauteur de 1000 mètres?

De la formule $e = \frac{1}{2}gt^2$ (60), on tire $t = \sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{\frac{2000}{9,8088}} = 14^s,28.$

IV. De quelle hauteur devrait tomber un corps, dans le vide, pour acquérir une vitesse de 300 mètres?

La formule $v^2 = 2ge$ (60) donne $e = \frac{v^2}{2g}$, d'où $e = \frac{90000}{2.9,8088} = 4587^m,7.$

V. Sur un plan incliné dont la longueur AB (fig. 30) égale 1000 mètres, et la hauteur BC 5 mètres, quel est l'effort nécessaire pour traîner un poids de 2500 kilogrammes, abstraction faite du frottement?

En représentant par P le poids, et par F la force cherchée, on a vu (57) qu'on a l'égalité $\frac{F}{P} = \frac{BC}{AB}$, d'où $F = \frac{P \times BC}{AB} = \frac{2500 \times 5}{1000} = 12^k,500.$

VI. Un projectile étant lancé verticalement, de bas en haut, dans le vide, avec une vitesse initiale de $245^m,22$, on demande après quel temps le mobile s'arrêtera pour retomber, et à quelle hauteur il s'élèvera.

Soient a la vitesse initiale imprimée au mobile et t la durée de l'ascension; la pesanteur agissant pendant ce temps comme force retardatrice, diminue la vitesse a d'une quantité égale à g en une seconde, et d'une quantité gt au bout de t secondes; on a donc, au moment où le corps s'arrête, $gt = a$,

$$\text{d'où } t = \frac{a}{g} = \frac{245,22}{9,8088} = 25^s.$$

Pour calculer la hauteur à laquelle s'élève le mobile, observons que, pendant son ascension, la pesanteur lui enlevant graduellement la vitesse qu'elle lui communiquerait en temps égal, s'il tombait, il faut que le corps mette à s'élever à sa plus grande hauteur e précisément le temps qu'il mettrait à en descendre. Donc, la hauteur d'ascension peut se calculer par la formule $e = \frac{1}{2}gt^2$ (60), qui donne $e = 4^m,9044 \times 625 = 3065^m,25$.

---

* CHAPITRE IV

DE QUELQUES PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES AUX CORPS SOLIDES

69. Diverses propriétés particulières. — Après avoir fait connaître les principales propriétés communes aux solides, aux liquides et aux gaz, nous traiterons ici de quelques propriétés particulières aux solides. Ces propriétés sont l'*élasticité de traction*, l'*élasticité de torsion*, l'*élasticité de flexion*, la *ténacité*, la *ductilité* et la *dureté*.

70. Élasticité de traction. — Nous avons déjà traité de l'élasticité comme propriété générale (20); mais il s'agissait seulement de l'élasticité développée par la pression. Or, dans les solides, l'élasticité peut encore se manifester par traction, par torsion et par flexion.

Pour étudier les lois de l'élasticité de traction, Savart a fait usage de l'appareil représenté dans la figure 46. Cet appareil se compose d'un support de bois auquel on suspend les tiges ou les fils sur lesquels on veut expérimenter. On fixe à leur extrémité inférieure un plateau destiné à recevoir des poids, et l'on marque sur leur longueur deux points de repère A et B, dont on mesure exactement la distance à l'aide d'un cathétomètre (14), avant que le plateau soit chargé et après.

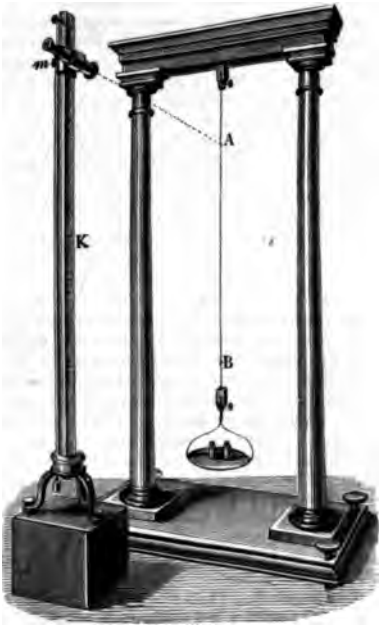


Fig. 46.

Tant que la limite d'élasticité n'a pas été dépassée, la traction des tiges et des fils est soumise aux trois lois suivantes :

1° *Les tiges et les fils ont une élasticité parfaite, c'est-à-dire qu'ils reprennent exactement leur longueur primitive aussitôt que la traction cesse.*

2° *Pour une même substance et un même diamètre, l'allongement est proportionnel à la force de traction et à la longueur.*

3° *Pour des tiges ou des fils de même longueur, de même matière, mais d'inégale grosseur, les allongements sont en raison inverse des carrés des diamètres.*

Le calcul et l'expérience montrent que, lorsque les corps s'allongent par traction, leur volume augmente.

Wertheim, qui a fait de nombreuses expériences sur l'élasticité des métaux, constaté, entre — 15 et 200 degrés, que l'élasticité décroît d'une manière continue à mesure que la température s'élève; le fer et l'acier font exception, leur élasticité augmentant jusqu'à 100 degrés et diminuant ensuite. Le même physicien a trouvé qu'en général *toutes les causes qui augmentent la densité augmentent en même temps l'élasticité.*

71. **Élasticité de torsion.** — Les lois de la torsion des fils ont été déterminées par Coulomb, physicien français, mort en 1806. Dans ses recherches, savant faisait usage d'un appareil qu'on nomme *balance de torsion*, lequel se composé d'un fil métallique fin, pincé à sa partie supérieure, et tendu par un poids auquel est fixée une aiguille horizontale. Au-dessous est un cercle gradué, dont le centre se trouve sur le prolongement du fil lorsque celui-ci est vertical. Si l'écarte l'aiguille de sa position d'équilibre, d'un certain angle, qui est l'*angle de torsion*, la force nécessaire pour obtenir cet angle est elle-même la *force de torsion*. Après cette déviation, les molécules qui étaient disposées en ligne droite, suivant la longueur du fil, le sont suivant une hélice enroulée autour de ce fil. Si limite d'élasticité n'a pas été dépassée, les molécules tendent à reprendre la position primitive, et y reviennent, en effet, aussitôt que la force de torsion n'agit plus; mais elles ne s'y arrêtent pas. En vertu de leur vitesse acquise, elles dépassent cette position en donnant naissance à une torsion en sens contraire. L'équilibre se trouvant rompu de nouveau, le fil revient sur lui-même, et l'aiguille ne s'arrête au zéro du cadran qu'après un certain nombre d'oscillations des deux côtés de ce point.

Au moyen de l'appareil qui vient d'être décrit, Coulomb a constaté que lorsque l'amplitude des oscillations ne dépasse pas un petit nombre de degrés, ces oscillations sont soumises aux quatre lois suivantes :

1° *Elles sont très-sensiblement isochrones.*

2° *Pour un même fil, l'angle de torsion est proportionnel à la force de torsion.*

3° *Pour une même force de torsion et des fils de même diamètre, l'angle de torsion est proportionnel à la longueur des fils.*

4° *Pour une même force et une même longueur de fil, l'angle de torsion est inversement proportionnel à la quatrième puissance des diamètres.*

72. **Élasticité de flexion.** — Tous les solides taillés en lames minces et fixés par une de leurs extrémités peuvent, après avoir été plus ou moins courbés, revenir à leur première forme lorsqu'ils sont abandonnés à eux-mêmes. Cette propriété est très-sensible dans l'acier trempé, le bois, le papier.

L'élasticité de flexion trouve de nombreuses applications dans les arcs, les arbalètes, les ressorts de montre, les ressorts de voiture, les pesons qui servent de balances, et les dynamomètres destinés à mesurer la force des moteurs. L'élasticité du crin, de la laine, de la plume, est utilisée dans les matelas et les coussins en usage dans l'économie domestique.

Quelle que soit l'espèce d'élasticité que l'on considère, nous avons déjà observé (20) qu'il y a toujours une limite à l'élasticité, c'est-à-dire un déplacement moléculaire au delà duquel les corps sont brisés, ou du moins ne reprennent plus leur forme première. Plusieurs causes peuvent faire varier cette limite. On constate, en effet, que l'élasticité de plusieurs métaux est augmentée par l'écrou-

c'est-à-dire par le rapprochement des molécules, à froid, au moyen de la filière, du laminoir ou du marteau. Quelques substances, comme l'acier, la fonte, le verre, deviennent aussi plus élastiques et en même temps plus dures par la *trempe* (77).

L'élasticité est, au contraire, diminuée par le *recuit*, opération qui consiste à porter les corps à une température moins élevée que pour la trempe et à les refroidir ensuite lentement. C'est par le recuit que l'on gradue à volonté l'élasticité des ressorts. Le verre chauffé éprouvant une véritable trempe lorsqu'il se refroidit trop rapidement, c'est pour diminuer la fragilité des objets de verre récemment fabriqués qu'on les recuit sur un foyer dont on les éloigne ensuite lentement.

73. **Ténacité.** — La *ténacité* est la résistance qu'opposent les corps à la traction. Pour évaluer cette force, on façonne les corps en tiges cylindriques ou prismatiques, et on les soumet, dans le sens de leur longueur, à une traction mesurée en kilogrammes et suffisante pour déterminer la rupture.

La charge qui produit la rupture est directement proportionnelle à la section transversale des fils ou des prismes, et indépendante de leur longueur. D'après de nombreuses expériences sur les métaux, la force nécessaire à la rupture est à peu près triple de celle qui correspond à la limite d'élasticité.

La ténacité diminue avec la durée de la traction. On constate, en effet, que les tiges métalliques et autres cèdent, après un certain temps, à des charges moindres que celles qui seraient nécessaires pour produire immédiatement la rupture : dans tous les cas, la résistance à la traction est moindre que la résistance à la pression.

La ténacité ne varie pas seulement d'une substance à une autre, mais, à égalité de matière, elle varie encore avec la forme des corps. Pour des sections équivalentes, le prisme est moins résistant que le cylindre. Pour une quantité de matière donnée, le cylindre creux est plus résistant que le cylindre plein, et le *maximum* de ténacité a lieu lorsque le rayon extérieur est au rayon intérieur dans le rapport de 11 à 5.

Pour un même corps, la forme a la même influence sur la résistance à l'écrasement que sur la résistance à la traction. En effet, un cylindre creux, à masse et à hauteur égales, est plus résistant qu'un cylindre plein; d'où il résulte que les os des animaux, les plumes des oiseaux, les tiges des graminées, opposent plus de résistance que s'ils étaient pleins, la masse restant la même.

Enfin, la ténacité, de même que l'élasticité, varie pour un même corps avec le sens que l'on considère. Dans les bois, par exemple, la ténacité et l'élasticité sont plus grandes dans le sens des fibres que dans le sens transversal. Cette différence s'observe, en général, dans tous les corps dont la contexture n'est pas la même suivant toutes les directions.

74. **Adhésion.** — On nomme *adhésion* l'attraction moléculaire qui se manifeste entre les corps en contact. Deux glaces, par exemple, étant superposées, finissent par adhérer tellement, qu'on ne peut plus les séparer sans les rompre. Cette force agit non-seulement entre les solides, mais entre les solides et les liquides, entre les solides et les gaz.

L'adhésion entre les solides n'est point un effet de la pression atmosphérique, car elle s'observe dans le vide. Elle croît avec le degré de poli des surfaces et avec la durée de leur contact; en effet, la résistance à la séparation est d'autant plus grande, que le contact a été prolongé plus longtemps. Enfin, l'adhésion entre les corps solides est indépendante de leur épaisseur, ce qui indique que l'attraction moléculaire ne s'exerce qu'à de très-petites distances.

Plongés dans l'eau, dans l'alcool et dans la plupart des liquides, les corps solides en sortent recouverts d'une couche liquide; c'est l'adhésion qui la soutient.

Il se produit entre les solides et les gaz la même adhésion qu'entre les solides et les liquides. En effet, si l'on plonge une lame de verre ou de métal dans l'eau, on voit des bulles d'air apparaître à sa surface. Comme, dans ce cas, l'eau ne

pénètre pas dans les pores de la lame, ces bulles ne sauraient provenir de l'air qui en serait expulsé. Elles sont donc uniquement dues à une couche d'air qui recouvrait la lame et la *mouillait* à la manière d'un liquide.

75. **Ductilité.** — On nomme *ductilité* la propriété que possèdent un grand nombre de corps de changer de forme par l'effet de pressions ou de tractions plus ou moins considérables.

Pour certains corps, comme l'argile, la cire, de faibles efforts sont suffisants pour produire une déformation; pour d'autres, comme le verre, les résines, il faut en outre l'action de la chaleur; pour les métaux, il faut des efforts puissants, comme la percussion, la filière, le laminoir.

La ductilité prend le nom de *malléabilité* lorsqu'elle se produit sous le marteau. Le métal le plus malléable est le plomb, le plus ductile au laminoir est l'or; à la filière, c'est le platine.

La grande ductilité du platine a permis à Wollaston d'obtenir des fils de ce métal qui n'avaient que $\frac{1}{1200}$ de millimètre de diamètre. Pour arriver à ce résultat, ce savant recouvrait d'argent un fil de platine de $\frac{1}{5}$ de millimètre de diamètre, de manière à obtenir un cylindre de 5 millimètres de grosseur dont l'axe seul était de platine. En tirant ce cylindre à la filière, jusqu'à ce qu'il fût aussi fin que possible, les deux métaux s'allongeaient également. Faisant alors bouillir le fil dans l'acide azotique, l'argent était dissous, et le fil de platine restait seul. 1000 mètres de ce fil ne pesaient que 5 centigrammes.

76. **Dureté.** — La *dureté* est la résistance qu'offrent les corps à être rayés ou usés par d'autres corps.

Cette propriété n'est que relative; car un corps dur par rapport à une substance est mou par rapport à une autre. On distingue la dureté relative de deux corps en cherchant celui qui raye l'autre sans en être rayé. On a constaté ainsi que le plus dur de tous les corps est le diamant, car il les raye tous et n'est rayé par aucun. Après lui viennent le saphir, le rubis, le cristal de roche, les silex, les grès, etc. Les métaux à l'état de pureté sont assez mous.

Les alliages sont plus durs que leurs métaux. C'est pour augmenter la dureté de l'or et de l'argent, dans la bijouterie et dans la fabrication des monnaies, qu'on les allie avec le cuivre.

La dureté d'un corps n'est pas en rapport avec sa résistance à la pression. Le verre, le diamant, sont beaucoup plus durs que le bois; mais ils résistent beaucoup moins au choc du marteau.

La dureté des corps est utilisée dans les poudres à polir, telles que l'émeri, la ponce, le tripoli. Le diamant, étant le plus dur de tous les corps, ne peut s'user qu'à l'aide de l'*égrisée*, qui n'est elle-même que du diamant pulvérisé.

77. **Trempe.** — La *trempe* est le refroidissement brusque d'un corps après qu'il a été porté à une température élevée. Dans cette opération, l'acier et la fonte acquièrent une grande dureté, et c'est surtout dans ce but que la trempe est utilisée. Tous les instruments tranchants sont d'acier trempé. Mais il est des corps sur lesquels la trempe produit un effet tout opposé. L'alliage des *tam-tam*, qui est composé de 1 partie d'étain sur 4 de cuivre, devient ductile et malléable lorsqu'il est refroidi brusquement; au contraire, il est dur et fragile comme le verre lorsqu'il est refroidi avec lenteur.

LIVRE III

DES LIQUIDES

CHAPITRE PREMIER

HYDROSTATIQUE

78. **Objet de l'hydrostatique.** — L'*hydrostatique* est la science qui a pour objet l'étude des conditions d'équilibre des liquides et celle des pressions qu'ils exercent, soit dans leur masse, soit sur les parois des vases qui les contiennent.

La science qui traite du mouvement des liquides se nomme *hydrodynamique*, et l'application de celle-ci à l'art de conduire et d'élever les eaux se désigne spécialement sous le nom d'*hydraulique*. On ne traitera ici que de l'hydrostatique.

79. **Caractères généraux des liquides.** — On a déjà vu (5) que les liquides sont des corps dont les molécules, par suite d'une très-faible cohésion, cèdent au plus léger effort qui tend à les déplacer; d'où il résulte que ces corps n'affectent aucune forme stable, et qu'obéissant sans cesse à l'action de la pesanteur, ils prennent immédiatement la forme des vases dans lesquels on les verse. Leur fluidité n'est cependant pas parfaite; il existe toujours entre leurs molécules une adhérence qui produit une viscosité plus ou moins grande. Cette viscosité varie, du reste, d'un liquide à un autre; très-faible dans certains liquides, comme l'éther, l'alcool, elle est très-apparente dans l'acide sulfurique, dans les huiles grasses et dans les liqueurs fortement sucrées ou gommées.

La fluidité des liquides se retrouve, mais à un plus haut degré, dans les gaz; ce qui distingue ces deux espèces de corps, c'est que les liquides ne sont doués que d'une compressibilité et d'une élasticité à peine sensibles, tandis que les fluides aériformes sont éminemment compressibles et expansibles.

La fluidité des liquides est démontrée par la facilité avec laquelle ces corps s'écoulent et prennent toutes sortes de formes; leur faible compressibilité se constate par l'expérience suivante.

80. **Compressibilité des liquides.** — D'après l'expérience des académiciens de Florence rapportée précédemment (16), on a regardé longtemps les liquides comme complétement incompres-

sibles. Depuis, des recherches sur le même sujet ont été faites par plusieurs physiciens, et tous ont constaté que les liquides sont plus ou moins compressibles.

Les appareils destinés à mesurer la compressibilité des liquides ont reçu le nom de *piézomètres*. Nous allons décrire ici celui d'Œrsted avec les modifications qui y ont été faites par Despretz et Saigey. Cet appareil se compose d'un cylindre de cristal à parois épaisses, d'un diamètre de 8 à 9 centimètres (fig. 47). Ce cylindre, qui est complétement rempli d'eau, est fermé, à sa base, par un pied de cuivre, dans lequel il est solidement mastiqué; à sa partie supérieure, il s'ajuste dans une garniture cylindrique de cuivre, fermée par un plateau qui se dévisse à volonté. Ce plateau porte un entonnoir R, destiné à introduire l'eau dans le cylindre, et un petit corps de pompe, dans lequel est un piston fermant hermétiquement et qu'on fait marcher au moyen d'une vis de pression P.

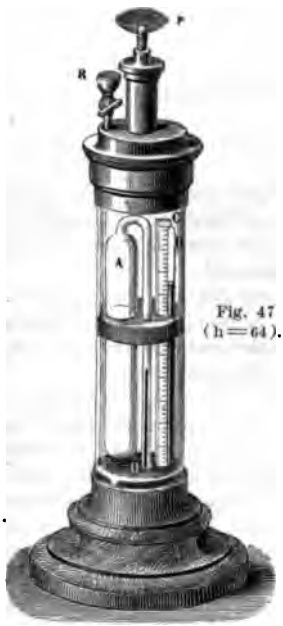


Fig. 47 (h = 64).

Dans l'intérieur de l'appareil est un réservoir de verre A, rempli du liquide à comprimer. Ce réservoir se termine, à sa partie supérieure, par un tube capillaire qui se recourbe et vient plonger dans un bain de mercure O. Ce tube a été divisé d'avance en n parties d'égale capacité, et l'on a déterminé le nombre N de ces parties contenues dans le réservoir A. Pour cela, soient p le poids de mercure à zéro contenu dans les n divisions du tube capillaire, et P le poids du même liquide contenu dans le réservoir A à la même température; on a l'égalité $\frac{N}{n} = \frac{P}{p}$, d'où $N = \frac{Pn}{p}$.

Dans l'intérieur du cylindre est un *manomètre à air comprimé*. On nomme ainsi un tube de verre B, plein d'air; le bout supérieur est fermé, et le bout inférieur, qui est ouvert, plonge dans le bain de mercure O. Lorsqu'on n'exerce aucune pression sur l'eau qui remplit l'appareil, le tube B est complétement plein d'air; mais lorsqu'au moyen de la vis P et du piston, on comprime

eau, la pression se transmet au mercure, qui s'élève dans le tube en comprimant l'air qu'il contient. Une échelle graduée C, plaée le long de ce tube, indique la réduction de volume de l'air, t c'est d'après cette réduction de volume qu'on apprécie la pression exercée sur le liquide contenu dans le cylindre, ainsi qu'il era démontré en traitant du manomètre (162). Enfin, sur la plaque e cuivre qui porte le manomètre est fixé un thermomètre qui onne la température de l'eau. Ce thermomètre n'est pas repréenté dans la figure.

Pour expérimenter avec le piézomètre, on commence par remlir le réservoir A du liquide à comprimer; puis, par l'entonnoir R, n remplit d'eau le cylindre. Tournant alors la vis P de manière à ire descendre le piston, celui-ci exerce une pression sur l'eau et e mercure qui sont dans l'appareil, et, par l'effet de cette pression, non-seulement le mercure s'élève dans le tube B, mais aussi ans le tube capillaire soudé au réservoir A, ainsi que le montre e dessin. Comme l'eau s'est échauffée par l'effet de la compression, on la laisse refroidir jusqu'à ce que le thermomètre soit reenu à la température initiale; observant alors à quelle hauteur e mercure s'élève dans le tube capillaire soudé au réservoir A, n en conclut que le liquide renfermé dans ce réservoir s'est conracté et de combien il s'est contracté. En effet, si l'on représente ar n' le nombre de divisions dont le mercure s'est élevé dans le ube capillaire, et par F la pression en atmosphères (160) marquée par le manomètre, $\frac{n'}{N+n}$ est la contraction pour l'unité de olume, et $\frac{n'}{(N+n)F}$ la contraction pour l'unité de volume et l'uité de pression, c'est-à-dire le *coefficient de compressibilité.* Toutefois ce n'est là que la compressibilité *apparente.* En effet, Ersted, dans ses expériences, avait supposé que la capacité du éservoir A demeurait invariable, ses parois étant également omprimées intérieurement et extérieurement par le liquide (81). Mais l'analyse mathématique prouve que ce volume diminue par 'effet des pressions extérieure et intérieure. C'est en tenant compte le ce changement de capacité que les expériences de Colladon et Sturm ont été faites. Ces savants ont ainsi trouvé, pour une pression égale au poids de l'atmosphère, et à la température de zéro, es coefficients de compressibilité absolue suivants :

Mercure.	5	millionièmes.
Eau distillée non privée d'air. . . .	49	—
Eau distillée privée d'air	51	—
Éther sulfurique.	133	—

Ils ont de plus observé, pour l'eau et le mercure, que, dans de certaines limites, le décroissement de volume est proportionnel à la pression.

Quelle que soit la compression à laquelle on ait soumis un liquide, l'expérience fait voir qu'aussitôt que l'excès de pression cesse, le liquide revient exactement à son volume primitif; d'où l'on conclut que *les liquides sont parfaitement élastiques.*

81. **Principe d'égalité de pression, ou principe de Pascal.** — En regardant les liquides comme parfaitement élastiques, doués d'une fluidité parfaite, et en les supposant soustraits à l'action de la pesanteur, on a été conduit au principe suivant, connu sous le nom de *principe d'égalité de pression*, et aussi sous celui de *principe de Pascal*, parce qu'il a été posé pour la première fois par le célèbre écrivain et géomètre Blaise Pascal.

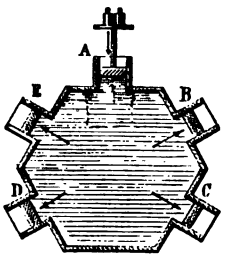


Fig. 48.

Toute pression exercée sur un liquide se transmet en tous sens, avec la même intensité, à surface égale à celle qui reçoit la pression.

Pour interpréter cet énoncé, concevons un vase de forme quelconque, rempli d'eau ou de tout autre liquide que nous supposerons sans poids, et soient, sur les parois de ce vase, diverses tubulures cylindriques A, B, C..., fermées par des pistons mobiles (fig. 48). Si, sur le piston supérieur A, on exerce, de dehors en dedans, une pression quelconque, de 20 kilogrammes, par exemple, instantanément cette pression se transmet sur la face interne des pistons B, C, D..., qui, tous, sont poussés de dedans en dehors par une pression 20, si leur surface égale celle du premier piston; mais pour des surfaces deux, trois fois plus grandes, la pression transmise est de 40 ou 60 kilogrammes, c'est-à-dire que non-seulement la pression se transmet également dans tous les sens, mais est *proportionnelle à la surface qui la reçoit.* Telle est la double signification qu'il faut attacher au principe ci-dessus, qui sert de base à toute l'hydrostatique.

Le principe d'égalité de pression doit être admis comme une conséquence de la constitution des liquides. Toutefois on peut, par l'expérience suivante, démontrer que la pression se transmet, en effet, dans tous les sens. Un tube dans lequel glisse un piston (fig. 49) est terminé par une sphère creuse sur laquelle sont placées de petites tubulures cylindriques perpendiculaires à ses parois. La sphère et le cylindre étant remplis d'eau, on pousse le

piston, et le liquide jaillit par tous les orifices, et non pas seulement par celui qui est opposé au piston.

Quant à la proportionnalité des pressions aux surfaces, on ne peut en donner une démonstration expérimentale rigoureuse, à cause de l'influence du poids des liquides et du frottement des

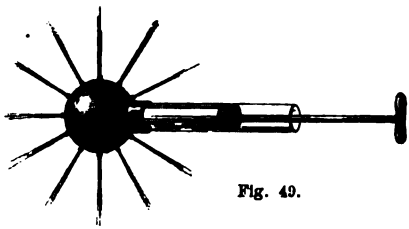


Fig. 49.

pistons. Cependant on arrive à une vérification approchée par l'expérience représentée dans la figure 50. Deux cylindres d'inégal diamètre, réunis par une tubulure, sont remplis d'eau, et sur la surface du liquide reposent deux pistons P et p, qui ferment hermétiquement les cylindres, mais qui peuvent glisser dans ceux-ci à frottement très-doux. Enfin supposons que la surface du grand piston égale, par exemple, trente fois celle du petit. Cela posé, si l'on place sur celui-ci un poids quelconque, soient 2 kilogrammes, aussitôt la pression résultante se transmet à l'eau et au grand piston, et comme cette pression est de 2 kilogrammes *sur chaque portion de surface égale à celle du petit piston*, il en résulte que le grand doit supporter de bas en haut une poussée de 30 fois 2, ou de 60 kilogrammes. En effet, si l'on charge le grand piston de ce poids, on remarque que l'équilibre persiste; mais pour une charge sensiblement plus grande ou plus petite, l'équilibre est rompu. En représentant par S et s les surfaces du grand et du petit piston, on peut donc poser :

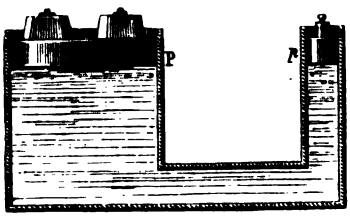


Fig. 50.

$$\frac{P}{p} = \frac{S}{s}, \quad \text{d'où} \quad Ps = pS.$$

Dans tout ce qui suit sur les pressions transmises par les liquides aux parois des vases, il *importe* d'observer que ces pres-

sions devront toujours être supposées *perpendiculaires à ces parois*. En effet, toute pression oblique se décompose en deux autres (30), l'une perpendiculaire à la paroi, et l'autre dirigée dans son plan; or cette dernière étant sans effet sur la paroi, c'est seulement la pression perpendiculaire qu'on a à considérer.

Enfin, observons que tout ce qu'on vient de dire du principe de Pascal ne s'applique pas seulement aux parois des vases, mais aux molécules liquides en un point quelconque de la masse.

PRESSIONS DÉVELOPPÉES DANS LES LIQUIDES PAR LA PESANTEUR

82. **Pression verticale de haut en bas, ses lois.** — Un liquide quelconque étant en repos dans un vase, si on le suppose partagé en tranches horizontales d'égale épaisseur, il est évident que chacune supporte le poids des tranches qui sont au-dessus d'elle. L'action de la pesanteur fait donc naître, dans la masse du liquide, des pressions intérieures variables d'un point à un autre. Ces pressions sont soumises aux lois suivantes :

1° *La pression, sur chaque tranche, est proportionnelle à la profondeur.*

2° *Pour une même profondeur, dans des liquides différents, la pression est proportionnelle à la densité du liquide.*

3° *La pression est la même sur tous les points d'une même tranche horizontale.*

Les deux premières lois peuvent être admises comme évidentes; la troisième est une conséquence de la première.

83. **Pression verticale de bas en haut.** — La pression que les tranches supérieures d'un liquide exercent sur les tranches inférieures fait naître dans celles-ci, de bas en haut, une réaction égale et contraire, qui est une conséquence du principe de la transmission de pression en tous sens. Cette pression de bas en haut se désigne sous le nom de *poussée des liquides*. Elle est très-sensible lorsqu'on plonge la main dans un liquide, surtout s'il a une grande densité, comme le mercure.

Pour la constater par l'expérience, on se sert d'un tube de verre A ouvert à ses deux extrémités (fig. 51). Après avoir appliqué contre l'extrémité inférieure un disque de verre O, qui sert d'obturateur, et qu'on soutient d'abord à l'aide d'un fil C, qui y est fixé, on plonge le tout dans l'eau, puis on abandonne le fil à lui-même. L'obturateur reste alors appliqué contre le tube, ce qui indique déjà qu'il supporte, de bas en haut, une pression supérieure à son poids. Enfin, si l'on verse lentement de l'eau dans le

tube, le disque supporte le poids de ce liquide, et il ne tombe qu'au moment où le niveau de l'eau, à l'intérieur, est le même qu'à l'extérieur; ce qui démontre que la pression de bas en haut, qui s'exerçait sur le disque, est égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section intérieure du tube A, et pour hauteur la distance verticale du disque à la surface supérieure du liquide dans lequel plonge le tube. On conclut de là que *la poussée des liquides, en un point quelconque de leur masse, est soumise aux trois mêmes lois que la pression verticale de haut en bas* (82).

Fig. 51.

84. **La pression est indépendante de la forme des vases.** — La pression exercée par un liquide, en vertu de son poids, sur un point quelconque de sa masse ou sur les parois du vase qui le contient, dépend, comme on l'a vu ci-dessus (82), de la profondeur et de la densité du liquide; mais *elle est indépendante de la forme du vase et de la quantité du liquide.*

Ce principe, qui est une conséquence du principe d'égalité de pression, peut se démontrer expérimentalement à l'aide de plusieurs appareils; nous en décrirons ici deux, également en usage dans les cours de physique : celui de de Haldat (fig. 52), et celui de Pascal, modifié par Masson (fig. 53).

L'appareil de de Haldat se compose d'un tube coudé ABC, terminé, en A, par un robinet de cuivre sur lequel on peut visser successivement deux vases M et P, de même hauteur, mais de forme et de capacité différentes. Pour faire l'expérience, on commence par verser du mercure dans le tube ABC, de manière que le niveau n'atteigne pas tout à fait le robinet A. On visse alors sur le tube le vase M, qu'on remplit d'eau; celle-ci, par son poids, refoule le mercure et l'élève dans le tube C, où l'on repère son niveau au moyen d'une virole *a*, qui peut glisser le long du tube. On marque de même le niveau de l'eau dans le vase M à l'aide d'une tige mobile placée au-dessus. Cela fait, on vide le vase M au moyen du robinet, on le dévisse et on le remplace par le vase P. Versant enfin de l'eau dans celui-ci, le mercure, qui avait repris son premier niveau dans les deux branches du tube ABC, s'élève de nouveau dans le tube C, et lorsque, dans le vase P, l'eau atteint la hauteur qu'elle avait dans le vase M, ce qu'on reconnaît au moyen de la tige *o*, le mercure reprend dans le tube C le *même* niveau que dans le

premier cas, ce qu'indique la virole *a*. On conclut de là que, dans les deux cas, la pression transmise au mercure dans la direction ABC est la même. Cette pression est donc indépendante de la forme du vase et de la quantité de liquide. Quant au fond du

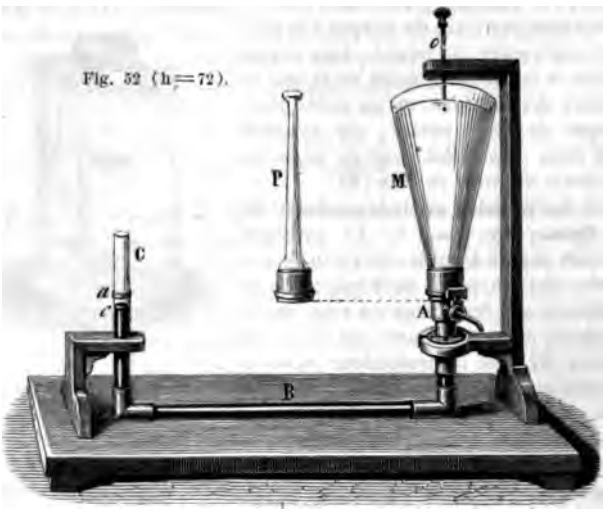


Fig. 52 (h=72).

vase, il est évidemment le même dans les deux cas, c'est-à-dire la surface du mercure dans l'intérieur du tube A.

Dans l'appareil de Masson (fig. 53), la pression de l'eau contenue dans le vase M ne s'exerce plus, comme dans celui de de Haldat, sur une colonne de mercure, mais sur un disque ou obturateur *a*, qui ferme une tubulure *c*, sur laquelle est vissé le vase M. Ce disque n'est pas fixé à la tubulure, mais seulement soutenu par un fil attaché à l'extrémité du fléau d'une balance. A l'autre extrémité est un bassin dans lequel on met des poids jusqu'à ce qu'ils fassent équilibre à la pression exercée par l'eau sur l'obturateur. Vidant alors le vase M, on le dévisse et l'on met à sa place le tube étroit P. Or, si l'on remplit celui-ci d'eau à la même hauteur que l'était le grand vase, ce qu'on reconnaît au moyen du repère *o*, on observe que, pour soutenir l'obturateur, il faut juste mettre dans le plateau le même poids qu'auparavant, ce qui conduit à la même conclusion que l'expérience de de Haldat. Même résultat si, au lieu du tube vertical P, on visse sur la tubulure *o* le tube oblique Q.

Il résulte des deux expériences qui précèdent qu'avec une très-petite quantité de liquide on peut produire des pressions considérables. Pour cela, il suffit de fixer, à la paroi d'un vase fermé et plein d'eau, un tube d'un petit diamètre et d'une grande hauteur.

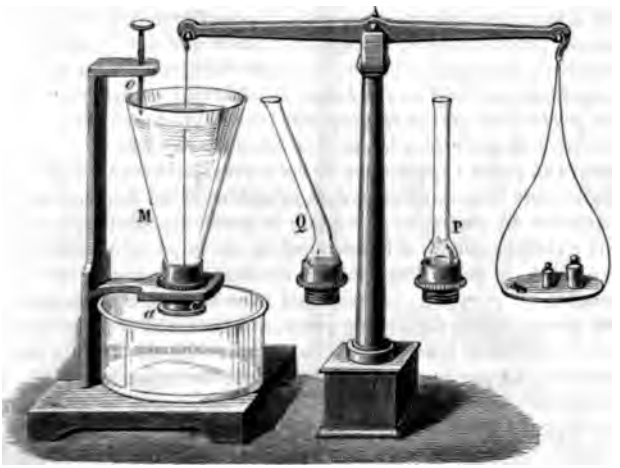


Fig. 53.

Ce tube étant rempli d'eau, la pression transmise sur la paroi du vase est égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette paroi et une hauteur égale à celle du tube. Pascal est parvenu ainsi, avec un simple filet d'eau de 10 mètres de hauteur, à faire éclater un tonneau solidement construit.

D'après le principe ci-dessus, on peut facilement calculer les pressions qui se produisent au fond des mers. En effet, il sera démontré bientôt que la pression de l'atmosphère équivaut à celle d'une colonne d'eau de 10 mètres. Or les navigateurs ont souvent observé que la sonde n'atteignait pas le fond des mers à une profondeur de 4 000 mètres. C'est donc une pression de plus de 400 fois celle de l'atmosphère qui s'exerce au fond de certaines mers.

85. **Pression sur les parois latérales, centre de pression.** — Les pressions que fait naître la pesanteur dans les liquides se transmettant en tous sens, d'après le principe de Pascal, il en résulte, en chaque point des parois latérales, des pressions soumises aux lois données précédemment (82), et agissant toujours perpendiculairement à ces parois, quelle que soit leur forme; car on a

vu (81) que toute pression oblique à une paroi se décompose en deux, l'une perpendiculaire à la paroi et produisant seule une pression, l'autre parallèle et ne produisant aucun effet. C'est la résultante des premières pressions qui représente la pression totale sur la paroi; mais ces pressions croissant proportionnellement à la profondeur et aussi proportionnellement à l'étendue de la paroi, leur résultante ne peut se trouver que par le calcul, qui fait voir que la pression totale, sur toute portion de paroi latérale, *est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base cette portion de paroi et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité à la surface libre du liquide.*

Quant au point d'application de cette pression totale, point qu'on désigne sous le nom de *centre de pression*, il est toujours un peu au-dessous du centre de gravité de la paroi. En effet, si les pressions exercées sur les différents points de la paroi étaient égales entre elles, le point d'application de leur résultante, c'est-à-dire le centre de pression, coïnciderait avec le centre de gravité de cette paroi; mais comme ces pressions croissent avec la profondeur, le centre de pression se trouve abaissé au-dessous du centre de gravité. La position de ce point se détermine par le calcul, qui conduit aux résultats suivants : 1° Sur une paroi rectangulaire, dont le bord supérieur est à fleur d'eau, le centre de pression est situé, du haut en bas, aux deux tiers de la ligne qui joint les milieux des côtés horizontaux. 2° Sur une paroi triangulaire dont la base est horizontale et à fleur d'eau, le centre de pression est au milieu de la ligne qui joint le sommet du triangle avec le milieu de cette base. 3° Si, la paroi étant encore triangulaire, le sommet est à fleur d'eau et la base horizontale, le centre de pression se trouve sur la ligne qui joint le milieu de cette base au sommet, et aux trois quarts à partir de ce point.

86. **Tourniquet hydraulique.** — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, il se produit sur les parois opposées, suivant chaque tranche horizontale, des pressions égales et contraires deux à deux, qui se détruisent, en sorte que rien n'indique alors l'existence de ces pressions; mais on les constate au moyen du *tourniquet hydraulique.* Cet appareil se compose d'un vase de verre M (fig. 54), reposant sur un pivot, de manière à pouvoir tourner librement autour d'un axe vertical. Ce vase porte, à sa partie inférieure, perpendiculairement à son axe, un tube de cuivre C, coudé horizontalement et en sens contraires à ses deux extrémités. L'appareil étant rempli d'eau, il en résulte, sur les parois du tube C, des pressions intérieures qui se détruiraient comme égales et contraires deux à deux, si le tube était complétement fermé.

Mais celui-ci étant ouvert à ses deux extrémités, le liquide s'écoule, et dès lors la pression ne s'exerce plus aux orifices ouverts, mais seulement sur la portion de paroi opposée A, ainsi qu'il est représenté sur la droite du dessin. La pression qui s'exerce en A, n'étant plus équilibrée par la pression opposée, imprime au tube et à tout l'appareil un mouvement de rotation dans le sens de la flèche, mouvement d'autant plus rapide, que la hauteur du liquide dans le vase M est plus grande, et que la section des orifices de sortie présente plus de surface.

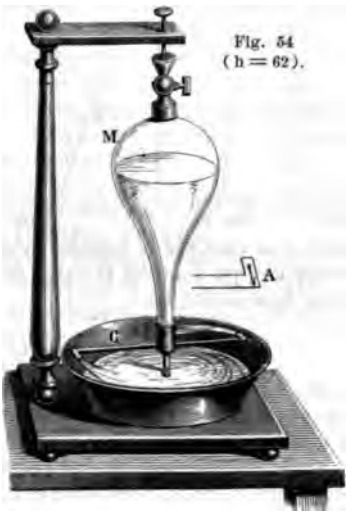


Fig. 54 (h = 62).

Les pressions latérales sont utilisées dans les moteurs hydrauliques connus sous le nom de *roues à réaction*.

87. **Paradoxe hydrostatique.** — On a vu ci-dessus (84) que la pression sur le fond d'un vase plein de liquide ne dépend ni de la forme du vase, ni de la quantité de liquide, mais seulement de la hauteur de celui-ci au-dessus du fond. Or on ne doit pas confondre la pression ainsi exercée sur le fond avec celle que le vase lui-même exerce sur le corps qui lui sert de support. Cette dernière est toujours égale au poids total du vase et du liquide qu'il contient, tandis que la première peut être plus grande que ce poids, plus petite ou égale, suivant la forme du vase.

Par exemple, soient trois vases, A, B, C (fig. 55, 56 et 57), de même fond, mais de capacités différentes, remplis d'eau à la même hauteur. La pression sur le fond des vases est la même dans les trois; mais celle transmise par les vases au support qui les soutient est variable. En effet, si dans le vase B on décompose les pressions normales aux parois en pressions horizontales et en pressions verticales, les premières se détruisent deux à deux; tandis que les pressions verticales s'ajoutant à celles qui s'exercent sur le fond, c'est la somme de toutes ces pressions qui s'exerce sur le support. Il est donc plus pressé qu'il ne le serait par le vase A, quoique la pression sur le fond soit la même de

les deux cas. Au contraire, dans le vase C, les pressions verticales étant dirigées en sens contraire des pressions sur le fond, ce n'est que la différence de ces pressions qui se transmet au support du vase; d'où ce support est moins pressé que par le vase A.

Cette contradiction apparente entre la pression exercée sur le

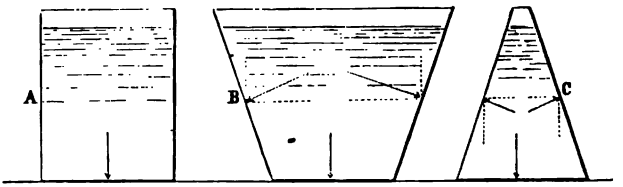


Fig. 55. Fig. 56. Fig. 57.

fond d'un vase par le liquide qu'il contient, et celle exercée sur le support qui soutient le vase, se désigne sous le nom de *paradoxe hydrostatique*.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES

88. **Équilibre d'un liquide dans un seul vase.** — Pour qu'un liquide demeure en équilibre dans un vase de forme quelconque, il doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

1° *Sa surface, en chaque point, doit être perpendiculaire à la direction de la résultante des forces qui sollicitent les molécules du liquide.*

2° *Une molécule quelconque, prise dans la masse, doit éprouver, en tous sens, des pressions égales et contraires.*

Pour démontrer que la première condition est nécessaire, supposons que *mp* représentant la direction de la résultante des forces qui sollicitent une molécule quelconque *m* de la surface (fig. 58), cette surface soit inclinée par rapport à la force *mp*. Celle-ci pourra alors se décomposer en deux forces *mq* et *mf* (30), l'une perpendiculaire à la surface du liquide, l'autre à la direction *mp*.

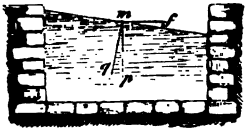


Fig. 58.

Or la première sera détruite par la résistance du liquide, tandis que la seconde entraînera la molécule dans la direction *mf*, ce qui démontre que l'équilibre est impossible.

Si la force qui sollicite le liquide est la pesanteur, *mp* est verticale, et alors, pour qu'il y ait équilibre, la surface libre du liquide doit être plane et horizontale (42), du moins si le liquide est contenu dans un vase ou un bassin d'une petite éten-

', puisqu'en chaque point la direction de la pesanteur est alors nème. Mais il n'en est plus ainsi pour une surface liquide ne grande étendue, comme celle des mers. En effet, cette sur- devant être, en chaque lieu, perpendiculaire à la direction la pesanteur, et celle-ci changeant d'un lieu à l'autre, en se geant toujours sensiblement vers le centre de la terre, il en ré- e que la surface des mers change de direction en même temps la pesanteur, et prend une forme sensiblement sphérique.

our prouver que le fil à plomb, en chaque lieu, est perpendi- ire à la surface des liquides en équilibre, tenant le fil à plomb main, comme dans la figure 10 (page 23), on en fait plonger la le dans un vase rempli d'eau, et l'on aperçoit alors dans l'eau image du fil exactement en ligne droite avec lui, ce qui n'au- pas lieu s'il était oblique à la surface du liquide.

uant à la deuxième condition d'équilibre, elle est évidente le-même; car si, dans deux directions opposées, les pressions s'exercent sur une molécule quelconque n'étaient pas égales ontraires, la molécule serait entraînée dans le sens de la plus ide pression, et il n'y aurait pas équilibre.

ans le cas d'un liquide soumis à la seule action de la pesan- ', ce qui est le cas général, cette seconde condition est, du e, une conséquence du principe d'égalité de pression et de la tion que toute pression fait naître dans la masse des liquides. 'on pourrait l'énoncer en disant que, *dans un liquide pesant, équilibre, les pressions t égales sur tous les ts d'une même tranche izontale.*

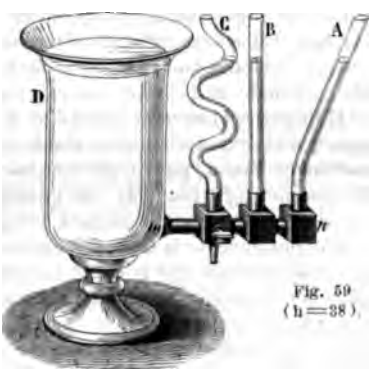


Fig. 59
(h=38).

9. Équilibre d'un même ide dans plusieurs vases mmuniquants. — Lorsque sieurs vases de forme lconque et contenant le me liquide communi- nt entre eux, il n'y a ilibre qu'autant que le uide, dans chaque vase, sfait aux deux conditions cédentes (88), et, de s, que *les diverses surfaces libres du liquide, dans tous les es, sont situées dans un même plan horizontal.*

oient, en effet, différents vases A, B, C, D, communiquant re eux (fig. 59); si l'on conçoit dans le tube de commu

tion *mn* une tranche liquide verticale, cette tranche ne pourra demeurer en équilibre qu'autant que les pressions qu'elle supporte de *m* vers *n* et de *n* vers *m* sont égales et contraires. Mais on a vu (85) que ces pressions sont respectivement équivalentes au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la tranche que nous considérons, et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité à la surface libre du liquide. Si l'on conçoit donc un plan horizontal passant par le centre de gravité de cette tranche, l'équilibre ne peut exister qu'autant que la hauteur du liquide au-dessus de ce plan est la même dans chaque vase; ce qui démontre le principe énoncé ci-dessus.

90. **Équilibre des liquides surperposés.** — Lorsque plusieurs liquides, qui ne peuvent se mélanger, sont superposés dans un même vase, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que chacun d'eux satisfasse aux conditions nécessaires dans le cas d'un seul liquide (88); de plus, *pour que l'équilibre soit stable, les liquides doivent être superposés par ordre de densités croissantes de haut en bas.*

Cette dernière condition se démontre expérimentalement au moyen de la *fiole des quatre éléments*. On nomme ainsi un flacon long et étroit, contenant du mercure, de l'eau saturée de carbonate de potasse, de l'alcool coloré en rouge, et de l'huile de naphte. Lorsqu'on agite le flacon, les liquides semblent se mélanger; mais aussitôt qu'on le maintient au repos, le mercure, qui est le plus dense, se précipite au fond; puis, au-dessus du mercure, se déposent successivement l'eau, l'alcool et l'huile de naphte. Tel est, en effet, l'ordre des densités décroissantes de ces corps. C'est afin que l'eau ne se mêle pas à l'alcool qu'on la sature de carbonate de potasse, ce sel n'étant pas soluble dans l'alcool.

Il importe d'observer que l'état d'équilibre des liquides superposés n'est rigoureusement stable qu'autant qu'ils ne peuvent se mélanger. Sinon, par un phénomène qui sera décrit bientôt, sous le nom de *diffusion* (122), ils finissent par se mélanger spontanément, quoique les plus denses occupent la partie inférieure.

L'expérience de la fiole des quatre éléments doit être rapportée à la même cause qui fait que les solides plongés dans un liquide plus dense qu'eux viennent flotter à la surface (99).

C'est en vertu du même principe d'hydrostatique que l'eau douce, à l'embouchure des fleuves, surnage assez longtemps au-dessus de l'eau salée de la mer. C'est par la même cause que la crème, qui est moins dense que le lait, s'en sépare peu à peu pour se rendre à la surface.

91. **Équilibre de deux liquides hétérogènes dans deux vases communiquants.** — Lorsque deux liquides de densités différentes

et sans action chimique l'un sur l'autre sont contenus dans deux vases communiquants, aux conditions déjà connues d'équilibre (88), il faut encore ajouter celle-ci, que *les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre doivent être en raison inverse des densités des deux liquides.*

Pour le démontrer, on prend deux tubes de verre, *m*, *n*, réunis par un tube à petit diamètre, et fixés sur un planchette verticale (fig. 60); on y verse une certaine quantité de mercure, puis, dans une des branches AB, on verse de l'eau. La colonne AB exerçant en B une pression sur le mercure, le niveau de celui-ci baisse dans la branche AB et s'élève dans l'autre d'une quantité CD; en sorte que, l'équilibre étant établi, si l'on conçoit en B un plan horizontal BC, la colonne d'eau AB fait équilibre à la colonne de mercure DC. Mesurant alors les hauteurs DC et AB au moyen de deux échelles fixées parallèlement aux deux tubes, on trouve que la première est 13 fois et demie plus petite que AB. Or on verra bientôt que la densité du mercure est 13 fois et demie plus grande que celle de l'eau; donc les hauteurs sont bien en raison inverse des densités. En effet, les pressions sur une même tranche horizontale BC devant être les mêmes, ce résultat ne peut se réaliser qu'autant qu'on gagne en hauteur ce qu'on perd en densité.

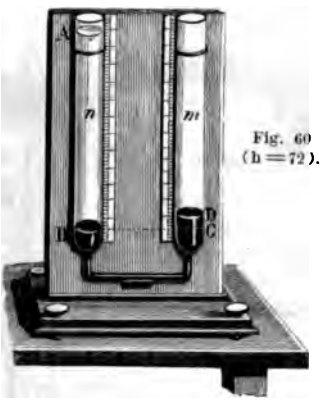


Fig. 60 (h = 72).

On peut déduire le principe précédent d'un calcul fort simple. Pour cela soient d et d' les densités de l'eau et du mercure, h et h' les hauteurs de ces liquides qui se font équilibre, et g l'intensité de la pesanteur. La pression en B étant proportionnelle à la densité du liquide qui est au-dessus, à sa hauteur et à l'intensité de la gravité, cette pression a pour mesure le produit dhg. Par la même raison, la pression qui s'exerce en C a pour mesure $d'h'g$. Mais, lorsqu'il y a équilibre, ces pressions sont égales; on a donc $dhg = d'h'g$, ou $dh = d'h'$, en supprimant le facteur commun g. Or cette dernière égalité n'est autre chose que l'expression du principe qu'il s'agissait de démontrer; car les deux produits dh et $d'h'$ devant toujours rester égaux entre eux, il s'ensuit que plus d' sera grand par rapport à d, plus h' sera petit par rapport à h.

Ce principe d'hydrostatique peut servir à déterminer la densité d'un liquide. En effet, supposons que, l'une des branches du tube précédent contenant de l'eau, et l'autre de l'huile, les hauteurs respectives des colonnes liquides qui se font équilibre soient 38 centimètres pour l'huile et 35 pour l'eau. La densité de l'eau étant prise pour unité, si l'on représente par x celle de l'huile, on a

$$38 \times x = 35 \times 1; \text{ d'où } x = \frac{35}{38} = 0{,}921.$$

APPLICATIONS DES PRINCIPES D'HYDROSTATIQUE

92. **Presse hydraulique.** — Le principe d'égalité de pression (81) a reçu une importante application dans la *presse hydraulique*, dont l'idée est due à Pascal, mais qui a été construite pour la première fois à Londres, en 1796, par Bramah.

Fig. 61.

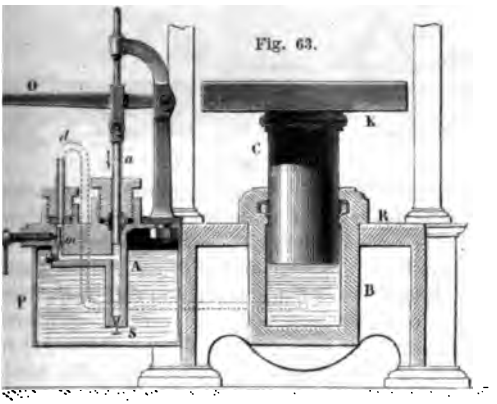
Cet appareil, à l'aide duquel on peut produire des pressions considérables, est tout de fonte. La figure 61 en donne une vue d'ensemble, et la figure 63 une coupe verticale. Dans un corps de pompe B, à grand diamètre et à parois très-résistantes, peut monter et descendre à frottement doux un cylindre C faisant l'office de piston. A celui-ci est fixé un plateau K qui monte et descend avec lui entre quatre colonnes. Ces dernières supportent un plateau MN qui est fixe, et c'est entre ce plateau et le plateau K que sont placés les objets qu'on veut mettre en presse.

Quant à l'ascension du piston C (fig. 63), elle s'obtient à l'aide

ist un cuir épais, imbibé
impermeable à l'eau, lequel
er hermétiquement le corps
. Ce cuir, recourbé en forme
nversé (fig. 62), s'enroule

Fig. 62.

ient dans une cavité pratiquée au haut de la paroi du
ompe. Plus l'eau est comprimée dans celui-ci, plus le
lique d'un côté sur la paroi du corps de pompe, de
le piston C, de manière à s'opposer à toute fuite.



le piston a sera de 150^k, et celui que transmettra le piston C, en supposant sa section égale à 100 fois celle du petit, sera de 15000^k.

Plus le diamètre du piston C est grand par rapport à celui du piston a, plus on gagne en force, mais plus la course du premier est lente par rapport à celle du second ; c'est-à-dire que *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*. C'est là, en effet, un principe général de mécanique qui se retrouve dans toutes les machines.

La presse hydraulique est utilisée dans tous les travaux qui nécessitent de grandes pressions. On l'emploie pour fouler les draps, pour extraire le suc des betteraves, l'huile des graines oléagineuses. Elle sert encore à éprouver les chaudières à vapeur et les chaînes destinées à la marine.

93. **Niveau d'eau.** — Le *niveau d'eau* est une application des

Fig. 64 ($l=90$).

conditions d'équilibre dans les vases communiquants (89). Il se compose d'un tube de fer-blanc ou de laiton coudé à ses deux extrémités ; à celles-ci sont adaptés deux tubes de verre D et E (fig. 64). Pour se servir de cet appareil, on le dispose horizontalement sur un pied à trois branches, et l'on y verse de l'eau jusqu'à ce que le liquide s'élève dans les deux tubes de verre. L'équilibre étant établi, le niveau de l'eau dans ces tubes est le même, et les surfaces du liquide en D et en E sont dans un même plan horizontal.

Cet instrument sert à prendre des nivellements, c'est-à-dire à déterminer de combien un point est plus élevé qu'un autre. Par exemple, si l'on veut trouver de combien un point B du sol est au-dessus d'un autre point A, on place en ce dernier point une *mire*. On nomme ainsi une règle de bois formée de deux tiges à coulisse, et terminée par une plaque de fer-blanc M, qu'on appelle le *voyant*, et qui porte à son centre un point de repère. Cette mire étant disposée verticalement en A, un observateur, placé près du niveau, dirige, par les surfaces D et E, un rayon visuel vers la

mire, et fait signe à un aide, qui la tient, de l'allonger ou de la raccourcir jusqu'à ce que le point de repère se trouve sur le prolongement de la ligne DE. Mesurant alors la hauteur AM, et en soustrayant la hauteur du niveau au-dessus du sol, on connaît de combien le point B est élevé au-dessus du point A.

Le niveau déterminé de la sorte est le *niveau apparent*, c'est-à-dire celui qui correspond à des points contenus dans un plan tangent à la surface du globe supposé parfaitement sphérique. Le *niveau vrai* est celui qui correspond à des points également distants du centre de la terre. Ce n'est que pour de faibles distances que le niveau apparent peut être pris pour le niveau vrai.

94. **Niveau à bulle d'air.** — Le *niveau à bulle d'air* est plus sensible et plus précis que le niveau d'eau. Il consiste en un tube de verre AB (fig. 65) très-légèrement cintré, qu'on remplit d'un

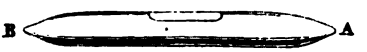


Fig. 65.

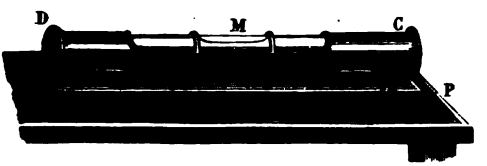


Fig. 66.

liquide très-fluide, comme l'alcool ou l'éther, en y conservant une petite bulle d'air, qui tend toujours à occuper la partie la plus élevée (90). Ce tube, étant soudé à la lampe à ses deux extrémités, est renfermé dans un étui de cuivre CD ouvert en dessus (fig. 66). Celui-ci est fixé sur une règle de même métal, dressée avec soin, de manière que lorsque l'instrument repose sur un plan horizontal P, la bulle d'air M s'arrête exactement entre deux points de repère marqués sur l'étui.

Pour prendre des nivellements avec cet instrument, on le fixe à une lunette dont il sert à indiquer les directions horizontales.

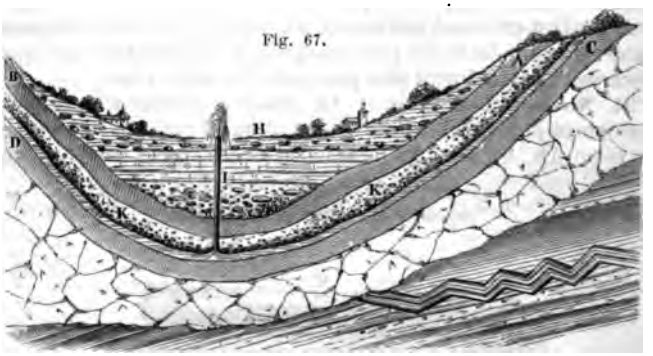
95. **Cours d'eau, puits artésiens.** — Les mers, les sources, les rivières, sont autant de vases communiquants dans lesquels les eaux tendent sans cesse à prendre un niveau vrai (93).

Il en est de même des *puits artésiens*, ainsi nommés parce que c'est dans l'ancienne province d'Artois qu'ils ont d'abord été pratiqués. On y en rencontre dont l'origine paraît remonter à la fin du XIIe siècle. A une époque beaucoup plus reculée, des puits de ce genre ont été creusés en Chine et en Égypte.

Ces puits sont des trous très-étroits, forés à la sonde, et d'une

profondeur très-variable. Leurs eaux sont généralement jaillissantes. Pour en comprendre la théorie, remarquons que les terrains qui composent l'écorce du globe sont, les uns perméables aux eaux, comme les sables, les graviers; les autres imperméables, comme les argiles. Cela posé, soit un bassin géographique H plus ou moins étendu, au-dessous duquel gisent deux couches imperméables AB, CD (fig. 67), comprenant entre elles une couche perméable

Fig. 67.



KK. Soit, enfin, cette dernière en commmunication avec des terrains plus élevés, à travers lesquels s'infiltrent les eaux des pluies. Ces eaux, suivant la pente naturelle du terrain à travers la couche perméable, se rendent au-dessous du bassin géographique que nous avons supposé, sans pouvoir communiquer avec lui, en étant séparées par la couche imperméable AB. Mais si, à partir du sol, on pratique un trou qui traverse cette couche, les eaux, tendant toujours à se mettre de niveau, s'élèvent dans ce trou à une hauteur d'autant plus grande, qu'elles communiquent avec un terrain plus élevé.

Les eaux qui alimentent les puits artésiens viennent souvent de vingt à trente lieues. Quant à la profondeur, elle varie avec les localités. Le puits foré de Grenelle, à Paris, a 548 mètres de profondeur. L'eau qui s'en dégage est, en toute saison, à 27 degrés. D'après la loi de l'accroissement de la température des couches terrestres, quand on s'abaisse au-dessous du niveau du sol (448), il suffirait que la profondeur de ce puits eût 150 mètres de plus pour que ses eaux sortissent, toute l'année, à 32 degrés, c'est-à-dire à la température des bains.

Le puits artésien de Passy a $587^{m},5$ de profondeur. La température de l'eau en est de 28 degrés.

CORPS PLONGÉS DANS LES LIQUIDES

96. Pressions supportées par un corps plongé dans un liquide. — Lorsqu'un corps solide est entièrement plongé dans un liquide, sa surface supporte en chaque point des pressions qui lui sont respectivement perpendiculaires, et qui croissent avec la profondeur. Si l'on conçoit toutes ces pressions décomposées en pressions horizontales et en pressions verticales, les premières, pour chaque tranche horizontale, sont égales et contraires deux à deux, et par conséquent se font équilibre. Quant aux pressions verticales, il est facile de voir qu'elles sont inégales et qu'elles tendent à mouvoir de bas en haut le corps immergé.

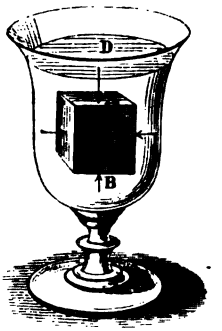


Fig. 68.

En effet, soit un cube plongé au milieu d'une masse d'eau (fig. 68), et supposons, pour plus de simplicité, ses parois latérales disposées verticalement. Ces parois supportent des pressions égales, puisqu'elles présentent la même surface et sont à la même profondeur (85). Pour deux faces opposées, il est d'ailleurs évident que les pressions sont de directions contraires; donc elles se font équilibre. Si nous considérons actuellement les pressions qui s'exercent sur les faces horizontales A et B, nous voyons que la première est pressée de haut en bas par le poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la face même et pour hauteur AD (85); de même, la face inférieure est poussée de bas en haut par le poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette face et pour hauteur BD (83). Le cube tend donc à être soulevé par la différence de ces deux pressions, laquelle est évidemment égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait même base et même hauteur que le cube; par conséquent, *cette pression équivaut au poids même du volume d'eau déplacé par le corps immergé.*

On peut encore reconnaître, par le raisonnement suivant, que tout corps immergé dans un liquide supporte, de bas en haut, une poussée égale au poids du liquide qu'il déplace. En effet, dans une masse liquide en équilibre, considérons une portion de liquide d'une forme quelconque, sphérique, ovoïde ou irrégulière, et supposons-la solidifiée, sans accroissement ni diminution de volume. Il est évident que la partie ainsi solidifiée supportera, de la part de la masse liquide, les *mêmes* pressions qu'auparavant

et que, par conséquent, elle sera encore en équilibre; ce qui ne peut avoir lieu que parce qu'elle supporte, de bas en haut, une poussée égale à son poids. Or, si à la place de la partie solidifiée on imagine un corps d'une autre substance, mais exactement de même volume et de même forme, ce corps supportera nécessairement les mêmes pressions que supportait le liquide solidifié, et dès lors il sera soumis, lui aussi, à une poussée égale au poids du liquide déplacé.

Quelle que soit la forme d'un corps plongé dans un liquide, toutes les pressions exercées à sa surface par ce liquide se réduisent à une force unique, qui est leur résultante, et le point d'application de cette résultante est le *centre de pression* du corps (85).

97. **Principe d'Archimède.** — D'après ce qui précède, tout corps

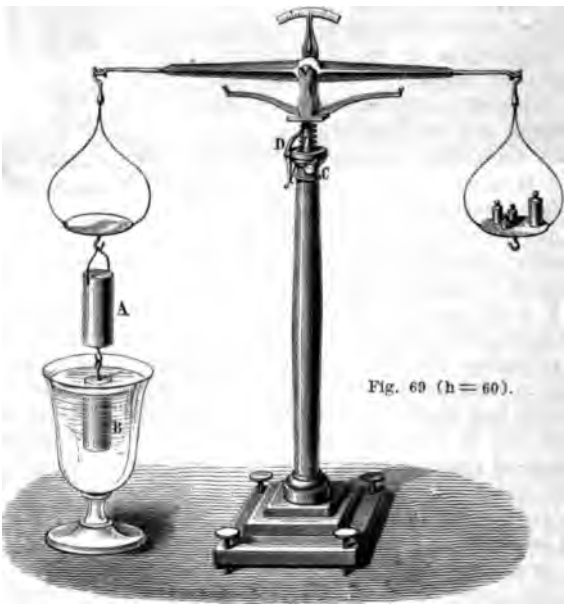


Fig. 69 (h = 60).

plongé dans un liquide est soumis à l'action de deux forces opposées : la pesanteur, qui tend à l'abaisser, et la poussée du liquide, qui tend à le soulever avec un effort égal au poids même du liquide que déplace le corps. Le poids de celui-ci est donc détruit en totalité ou en partie par cette poussée; d'où l'on conclut qu'*un corps*

longé dans un liquide perd une partie de son poids égale au oids du liquide déplacé.

Ce principe, qui sert de base à la théorie des corps plongés et es corps flottants, est connu sous le nom de *principe d'Archi-ède*, parce qu'il fut découvert par ce célèbre géomètre, mort à yracuse 212 ans avant l'ère chrétienne.

Le principe d'Archimède se démontre par l'expérience au moyen e la *balance hydrostatique*, laquelle est une balance ordinaire ont chaque plateau est muni d'un crochet, et dont le fléau peut 'élever et s'abaisser à volonté, à l'aide d'une crémaillère qu'on ait marcher par un petit pignon C (fig. 69). Un encliquetage D re-ent la crémaillère lorsqu'on l'a soulevée. Le fléau étant remonté, n suspend, au-dessous de l'un des plateaux, un cylindre creux A, e cuivre, et au-dessous de celui-ci, un cylindre plein B, dont le olume est exactement le même que la capacité du premier; puis, ans l'autre plateau, on place des poids jusqu'à ce que l'équilibre 'établisse. Si alors on remplit d'eau le cylindre A, l'équilibre est ompu; mais si l'on abaisse en même temps le fléau de manière ue le cylindre B plonge en entier dans l'eau d'un vase placé au-essous, on voit l'équilibre se rétablir. Le cylindre B perd donc, ar son immersion, une partie de son poids égale au poids de l'eau ersée dans le cylindre A. Or le principe d'Archimède se trouve insi démontré, puisque la capacité de ce dernier cylindre est pré-isément égale au volume du cylindre B.

98. **Détermination du volume d'un corps.** — Le principe d'Ar-himède donne le moyen d'obtenir avec précision le volume d'un orps de la forme la plus irrégulière, lorsqu'il n'est pas soluble ans l'eau et ne l'absorbe pas. Pour cela, l'ayant suspendu par n fil à la balance hydrostatique, on le pèse dans l'air, puis dans eau distillée et à 4 degrés. La perte de poids que l'on constate lors est le poids de l'eau déplacée. Du poids de cette eau on dé-uit son volume, et, par suite, celui du corps immergé, qui est videmment le même. Si, par exemple, la perte de poids est de 55 grammes, l'eau déplacée pèse 155 grammes; mais on sait ue le gramme est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée et 4 degrés; donc le volume de l'eau déplacée, et par conséquent elui du corps plongé, est de 155 centimètres cubes.

Si l'eau n'était pas à 4 degrés, il y aurait à faire une correction ui dépend des formules sur les dilatations (317).

99. **Équilibre des corps immergés et des corps flottants, méta-entre.** — D'après les considérations théoriques qui nous ont con-uits au principe d'Archimède (96 et 97), si un corps plongé dans n liquide a la même densité que lui, la poussée qui tend à sou-

lever ce corps est précisément égale à son poids. Le corps reste donc en suspension dans le sein du liquide.

Si le corps est plus dense que le liquide, il tombe, car son poids l'emporte sur la poussée de bas en haut.

Enfin, si le corps immergé est moins dense que le liquide, c'est

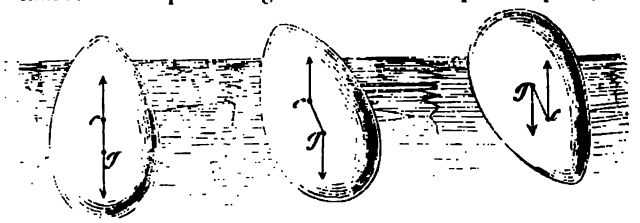


Fig. 70. Fig. 71. Fig. 72.

la poussée de celui-ci qui prédomine. Le corps prend donc un mouvement ascensionnel, et s'élève hors du liquide jusqu'à ce qu'il n'en déplace qu'un volume d'un poids égal au sien. On dit alors que le corps *flotte*. La cire, le bois et tous les corps plus légers que l'eau, flottent à sa surface.

Pour qu'un corps plongé dans un liquide, ou flottant à sa surface, demeure en équilibre, il faut deux conditions :

1° *Le corps doit déplacer un poids de liquide égal au sien.*

2° *Son centre de gravité et le centre de pression du liquide déplacé doivent être sur une même verticale.*

En effet, ces deux conditions étant satisfaites, le poids du corps, appliqué à son centre de gravité, et la poussée de bas en haut, appliquée au centre de pression, sont deux forces non-seulement égales, mais directement opposées ; donc elles se font équilibre. On va voir dans quel cas cet équilibre est stable ou instable.

1° Lorsque le centre de gravité est au-dessous du centre de pression (fig. 70), l'équilibre est toujours stable ; car si le corps est légèrement écarté de sa position d'équilibre (fig. 71), les forces appliquées en c et en g tendent évidemment à l'y ramener.

2° Si le centre de gravité est au-dessus du centre de pression, l'équilibre tend à être instable ; car le corps étant déplacé de sa position d'équilibre (fig. 72), les forces appliquées en g et en c tendent à l'en écarter davantage.

* *Métacentre.* — Toutefois, dans le dernier cas ci-dessus, il peut y avoir équilibre stable. Par exemple, soit ABC (fig. 73) la section d'un navire par un plan passant par la verticale xy, sur laquelle sont situés le centre de gravité g du navire et le centre de pression c du liquide déplacé. Lorsque le navire incline dans la position A'B'C', la ligne xy incline en $x'y'$, et le centre de gravité, qui ne change pas par rapport au navire, passe de g en g', tandis que la forme

é n'étant plus la même, le centre de pression change par rap-
t prend, par exemple, la position c'. Cela posé, soit menée par
erticale qui coupe la droite $x'y'$ en m, point où l'on peut sup-
a poussée du liquide. Si le point m est situé au-dessus du point
que les forces appliquées en m et en g' auront pour effet de
s à sa première position ABC, et que par suite l'équilibre est
ntraire, le point m est au-
de gravité en m', les deux
en m' et en g' ont pour effet
le navire, et l'équilibre est
e le nom de *métacentre* au
rticale $c'm$ coupe la droite
o résumer ce qui précède en
lottants, qu'*ils sont en équi-*
il le métacentre est plus haut
ravité du corps flottant; et
ble, lorsque le métacentre est

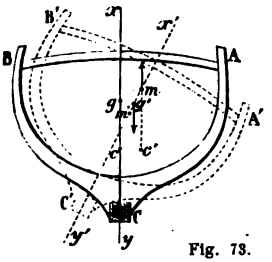


Fig. 73.

n du métacentre et du centre
ne grande importance dans
rires; car c'est de leur position relative que dépend la stabilité.

principe d'Archimède, les corps flottent d'autant
t à la surface des liquides, que ceux-ci sont relati-
vement plus denses. Qu'on mette, par
exemple, un œuf dans de l'eau ordi-
naire, il va au fond, parce qu'à volume
égal il pèse davantage; mais qu'on le
plonge dans de l'eau saturée de sel, il
surnage. Un morceau de chêne flotte sur
l'eau; mais il est submergé dans l'huile.
Une masse de fer surnage dans un bain
de mercure; dans l'eau, elle va immé-
diatement au fond. Quant au volume de
la partie immergée, dans les corps flot-
tants, *il est en raison inverse de la*
densité du liquide, et en raison directe
de celle du corps flottant.

Fig. 74.

100. **Ludion.** — Les effets divers de
suspension, d'immersion et de flottaison
dans un liquide sont reproduits avec le
petit appareil qu'on nomme *ludion*. Il
se compose d'une éprouvette de verre
remplie d'eau en partie, et surmontée
d'un tube de cuivre dans lequel est un
piston qu'on fait marcher avec la main,
ermétiquement (fig. 74). Dans le liquide est une
'émail, soutenue par une *boule* de verre (

qui contient de l'air et de l'eau, et flotte à la surface. Cette b
est percée, à sa partie inférieure, d'une petite ouverture pa
quelle l'eau peut pénétrer ou sortir, selon que l'air intérieu
la boule est plus ou moins comprimé. La quantité d'eau pr
blement introduite dans la boule est telle, que l'appareil n'a be
que d'un très-petit excès de poids pour s'immerger tout à
Si l'on exerce donc avec la main une légère pression sur le pi
comme le montre la figure, l'air qui est au-dessous se tr
comprimé, et transmet sa pression à l'eau du vase et à l'ai
est dans la boule. Il en résulte qu'une certaine quantité d
pénètre dans celle-ci, et que le corps flottant, rendu plus lo
s'immerge. Si l'on cesse alors la pression, l'air de la bou
détend, chasse l'excès d'eau qui y a pénétré, et le corps imm
devenu plus léger, flotte de nouveau.

101. **Vessie natatoire des poissons.** — Chez les poissons, un g
nombre d'espèces portent dans l'abdomen, au-dessous de l'
dorsale, une vessie pleine d'air qu'on nomme *vessie natatoir*
poisson, en la comprimant ou en la dilatant par un effort mu
laire, fait varier son volume, et obtient des effets analogues à
qu'on vient d'observer dans le ludion.

102. **Natation.** — Le corps humain, à volume égal, est gé
lement plus léger que l'eau douce : aussi peut-il flotter natu
ment sur ce liquide, et mieux encore sur l'eau salée de la me
est plus dense. La difficulté de la natation est donc moins
maintenir à la surface de l'eau que de pouvoir tenir la tête ho
liquide, afin de respirer librement. Or, chez l'homme, la tête,
un grand poids par rapport aux membres inférieurs, tend à plo
c'est ce qui fait que la natation est pour l'homme un art qu'il
cultiver. Chez les quadrupèdes, au contraire, la tête, pesant n
que la partie postérieure du corps, peut sans effort demeurer
de l'eau ; aussi ces animaux nagent-ils naturellement.

POIDS SPÉCIFIQUES, ARÉOMÈTRES A VOLUME CONSTANT

103. **Définitions des poids spécifiques.** — On a vu (45) qu
poids spécifique d'un corps, soit solide, soit liquide, *est le*
port du poids d'un volume quelconque de ce corps, supp
zéro, au poids d'un égal volume d'eau distillée, celle-ci
a 4 degrés au-dessus de zéro. Les poids spécifiques des
exprimant ainsi combien ils pèsent par rapport à l'eau, il e
sulte que le poids spécifique de ce liquide est pris pour uni
est représenté par 1.

D'après la définition qui précède, si l'on représente par

poids d'un corps dont le volume est V à zéro, par p le poids à 4 degrés d'un égal volume d'eau distillée, et par D le poids spécifique du corps, on a $D = \frac{P}{p}$ [1]. Or, dans le système métrique, 1 centimètre et 1 décimètre cubes d'eau distillée pesant, à 4 degrés, respectivement 1 gramme et 1 kilogramme, pour l'eau, prise dans ces conditions, on a toujours numériquement $p = V$, si l'on a soin de compter le poids en grammes ou en kilogrammes, suivant que le volume l'est en centimètres ou en décimètres cubes. La formule [1] ci-dessus devient donc $D = \frac{P}{V}$ [2]; ce qui permet de dire que le poids spécifique d'un corps est *le rapport de son poids à son volume.*

Enfin, si dans l'égalité [2] on prend $V = 1$, on a $D = P$; d'où l'on peut dire encore que le poids spécifique d'un corps est *son poids sous l'unité de volume.* Dans la détermination des poids spécifiques, nous nous appuierons sur la première définition, celle représentée par la formule $D = \frac{P}{p}$, qui est indépendante de tout système de poids et mesures.

104. **Températures adoptées dans la recherche des poids spécifiques.** — La condition de températures fixes, pour les corps dont on recherche le poids spécifique et pour l'eau à laquelle on les compare, est nécessaire; car les volumes des corps, solides ou liquides, variant inégalement avec la température, il en est de même de leurs poids spécifiques. C'est pourquoi on est convenu de prendre les corps à la température de zéro, et l'eau à 4 degrés, parce que c'est à cette température qu'a lieu son maximum de densité. La condition que l'eau soit distillée est aussi nécessaire, son poids variant avec les substances qu'elle tient en dissolution.

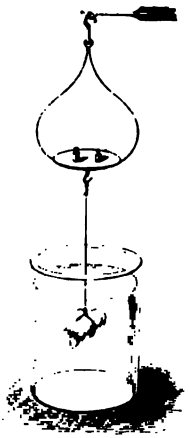
Ces différentes conditions n'étant généralement pas satisfaites dans les méthodes qu'on emploie pour la détermination des poids spécifiques, on a à effectuer des corrections relatives à la température des corps, à celle de l'eau, et enfin à la perte de poids qu'éprouvent les corps pesés dans l'air (173). On verra, dans l'étude de la chaleur, les calculs relatifs à ces corrections (318). Du reste, elles sont presque toujours très-petites, et peuvent être négligées pour les corps lourds, comme les métaux et les pierres. Nous en ferons donc abstraction pour le moment.

Trois méthodes sont employées pour déterminer les poids spécifiques des solides et des liquides : la *méthode de la balance hydrostatique,* celle des *aréomètres* et celle du *flacon.* Toutes les trois reviennent à chercher d'abord le poids du corps do

veut avoir le poids spécifique, puis celui d'un égal volume d'eau, et à diviser le premier poids par le second. Nous allons successivement appliquer ces diverses méthodes à la recherche des poids spécifiques des solides et des liquides.

105. **Détermination des poids spécifiques des solides.** — 1° *Méthode de la balance hydrostatique.* — Pour obtenir le poids spécifique d'un solide non soluble dans l'eau, au moyen de la balance hydrostatique (fig. 69), on le place dans un des plateaux, et dans l'autre on lui fait équilibre avec une tare. Enlevant alors le corps et le remplaçant par des poids gradués, c'est-à-dire par des

Fig. 75.



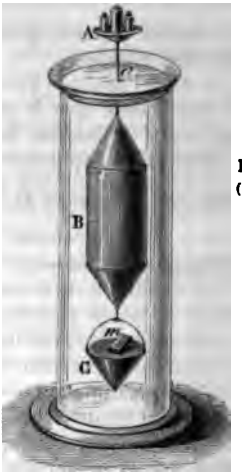


Fig. 76 (h=80).

grammes et des fractions de gramme, jusqu'à ce que l'équilibre se rétablisse, on a, par la méthode des doubles pesées, le poids P du corps dans l'air. On le suspend ensuite, par un fil fin, au crochet du plateau dans lequel on l'a pesé (fig. 75), et on le plonge dans l'eau, en conservant dans l'autre plateau la même tare. Le corps ainsi immergé, perdant une partie de son poids égale à celui de l'eau déplacée (96), on ajoute un poids p qui ramène la balance à sa première position, et représente le poids de l'eau déplacée sous un volume égal à celui du corps; on a donc $D = \frac{P}{p}$.

2° *Méthode de l'aréomètre de Nicholson.* — L'*aréomètre de Nicholson* est un appareil flotteur qui sert à déterminer les poids spécifiques des solides. Il se compose d'un cylindre creux de fer-blanc (fig. 76), auquel est suspendu un cône C rempli de plomb.

ı pour objet de lester l'appareil de manière que son centre é se trouve au-dessous du centre de pression, condition e pour que l'équilibre soit stable (99). A sa partie supé- 'appareil se termine par une tige et un plateau A; ce st destiné à recevoir des poids et le corps dont on cher- ıids spécifique. Enfin, sur la tige, en *o*, est marqué un ɔn nomme *point d'affleurement*, et qui sert à indiquer ıppareil plonge de la même quantité.

xpérimenter avec cet instrument, on cherche d'abord le 'il faut mettre dans le plateau A pour que l'aréomètre ıns l'eau jusqu'à son point d'affleurement; car, à vide, il n partie hors de l'eau. Supposons que ce poids soit ımes, et admettons qu'il s'agisse de trouver le poids spé- u soufre. On en prend un morceau d'un poids moindre grammes, on le place dans le plateau A, puis on ajoute ımes jusqu'à ce que l'aréomètre affleure de nouveau. S'il jouter, par exemple, 55 grammes, il est évident que le soufre est la différence entre 125 et 55, c'est-à-dire 70. nsi déterminé le poids du soufre dans l'air, il ne reste ı trouver le poids d'un égal volume d'eau. Pour cela, on ıréomètre, et l'on porte le morceau de soufre du plateau A ateau inférieur C, en *m*. Le poids total de l'instrument changé, et cependant, en le plongeant de nouveau, on e qu'il n'affleure plus, ce qui provient de ce que le sou- t immergé, perd de son poids une partie égale au poids qu'il déplace. Si l'on ajoute alors, dans le plateau supé- s poids jusqu'à ce que l'affleurement se rétablisse, 34gr,4 aple, c'est là le poids du volume d'eau déplacé, c'est-à- 'olume d'eau égal à celui du soufre. Il ne reste donc plus ser 70 grammes, poids du soufre dans l'air, par 34gr,4; ɔnne, pour le poids spécifique du soufre, 2,03.

ubstance dont on cherche le poids spécifique est plus lé- l'eau, elle tend à surnager et ne peut demeurer sur le nférieur C. On adapte alors à celui-ci un petit grillage ı fer mobile, qui s'oppose à l'ascension du corps, et le l'expérience se fait comme ci-dessus.

'hode du flacon. — Cette méthode, due à Klaproth, est ɜmployée pour les corps en poudre. On y fait usage d'un on à large goulot, fermé par un bouchon de verre usé à Ce bouchon est foré d'un trou qui se prolonge par une capillaire terminée elle-même par un tube à grand dia- g. 77). Sur cette tubulure est un point de repère *a*, et à esée on a soin de remplir d'eau le flacon exactemc

qu'à ce point, ce qui s'obtient en plongeant en entier le fla dans l'eau et en le bouchant pendant qu'il est ainsi immergé. flacon et la tubulure se trouvant alors complétement remplis, enlève l'excès d'eau jusqu'au point *a*, au moyen d'un petit r leau de papier Joseph. Plaçant ensuite, dans un des plate d'une balance, le flacon exactement rempli d'eau distillée, fer et essuyé avec soin, et à côté le corps dont on cherche le po spécifique, en fragment ou en poudre, on lui fait équilibre d l'autre plateau avec de la grenaille de plo Enlevant alors le corps, on le remplace par nombre de grammes P qui représente son po dans l'air. Cela fait, on retire le flacon, on le bouche et l'on y introduit le corps. Remettan bouchon de la même manière qu'il a été ci-dessus, on pose de nouveau le flacon dan plateau où il était d'abord. L'équilibre n'a p lieu; car une certaine quantité d'eau a été ex sée. Ajoutant des poids du côté du flacon jusq ce que la balance reprenne sa position horiz tale, le nombre de grammes ajouté représe le poids d'un volume d'eau égal à celui du co

Fig. 77.

Il ne reste donc plus qu'à faire le même calcul que dans les d méthodes précédentes.

Dans cette expérience, il importe d'expulser une petite quan d'air qui est adhérente à la surface des corps, et leur fait dépla un volume d'eau trop grand. A cet effet, après avoir introdui corps, soit en poudre, soit en fragment, dans l'eau du flacon, place celui-ci sous la cloche de la machine pneumatique et on le vide; l'air se dégage alors en vertu de sa force élastique. obtiendrait le même résultat en faisant bouillir l'eau.

106. **Corps solubles dans l'eau.** — Si, dans les trois métho que nous venons de décrire, il arrivait que le corps dont cherche le poids spécifique fût soluble dans l'eau, on prendrai poids spécifique de ce corps par rapport à un liquide dans leq il ne serait pas soluble, l'alcool par exemple. Puis, chercha par un des procédés que nous allons décrire, le poids spécifi de l'alcool par rapport à l'eau, on obtiendrait le poids spécifi de la substance donnée en multipliant son poids spécifique rapport à l'alcool, par celui de ce liquide par rapport à l'eau.

En effet, soient, à volume égal, P le poids de la substance, P′ celui de l'alc P″ celui de l'eau. $\frac{P}{P'}$ sera le poids spécifique de la substance par rapport à l'alc

lui de l'alcool par rapport à l'eau. Or le produit de ces deux fractions

poids spécifique de la substance par rapport à l'eau.

Poids spécifiques des solides à zéro, comparativement à celui de l'eau distillée et à 4 degrés, pris pour unité.

roui	23,000	Fonte	7,053
ndu	21,16	Zinc fondu	6,861
	19,258	Antimoine fondu	6,712
ndu	11,352	Diamants	3,501 à 3,531
ndu	10,474	Flint-glass	3,329
'ondu	9,822	Marbre statuaire	2,837
ge passé à la filière	8,878	Aluminium fondu	2,56
fondu	8,788	Verre de Saint-Gobain	2,488
	8,393	Soufre octaédrique	2,07
écroui	7,816	Sodium	0,972
rre	7,788	Glace fondante	0,930
	7,207	Potassium	0,865
du	2,291	Hêtre	0,852

Poids spécifique des liquides. — 1° *Méthode de la balance atique.* — Au crochet de l'un des plateaux de la balance nd un corps sur lequel le liquide dont on cherche le poids ne n'ait pas d'action chimique : par exemple, une boule de ou de verre, et on lui fait équilibre dans l'autre plateau e tare. Plongeant ensuite la boule successivement dans stillée et dans le liquide dont on cherche le poids spéci- oit l'alcool, l'équilibre est rompu, et les poids p et p' qu'il ter pour rétablir l'équilibre représentant le poids de l'eau , puis celui de l'alcool, à volume égal, on a $D = \frac{p'}{p}$.

thode de l'aréomètre de Fahrenheit. — L'aréomètre de eit (fig. 78) est un flotteur destiné à prendre les poids ies des liquides. Sa forme est analogue à celle de l'aréo- e Nicholson; mais il n'a pas de plateau à la partie infé- et il est de verre afin de pouvoir être placé dans toute es- liquides. Sa tige porte aussi un point d'affleurement des- btenir un volume immergé constant. Enfin, il est lesté à e inférieure par une petite boule remplie de mercure.

d'expérimenter avec cet aréomètre, on en détermine le vec précision; puis, le faisant flotter dans une éprou- mplie d'eau distillée, on ajoute des poids dans la capsule ire jusqu'à ce que le point d'affleurement atteigne le ni- l'eau. En cet état, d'après la première condition d'équi- s corps flottants (99), le poids de l'aréomètre, ajouté au ti est dans la capsule, représente le poids d'un volume al à celui de la partie immergée de l'instrument. Déter-

minant de la même manière le poids d'un égal volume du liquide dont on cherche le poids spécifique, il ne reste plus qu'à diviser le dernier poids par le premier.

3° *Méthode du flacon.* — Dans cette méthode, on fait usage d'un petit flacon de forme spéciale (fig. 79) : il se compose d'un réservoir cylindrique *b*, auquel est soudée une tige capillaire, et à celle-ci un tube plus gros *a*, fermé par un bouchon de verre dans le cas où l'on expérimente sur des liquides volatils. Sur la tige capillaire est un point de repère *c*, qui sert à marquer un volume constant de liquide.

Fig. 78.

Fig. 79.

Ayant placé le flacon vide et bien sec dans le plateau d'une balance, on lui fait équilibre par une tare, puis on le remplit d'eau distillée jusqu'en *c*, et on le remet dans la balance. Le poids *p* qu'il faut ajouter pour rétablir l'équilibre est le poids de l'eau contenue dans le flacon. Vidant alors celui-ci, le desséchant et le remplissant jusqu'en *c* du liquide dont on cherche le poids spécifique, on a son poids *p'* à volume égal : d'où encore $D = \frac{p'}{p}$.

Poids spécifiques des liquides à zéro, comparativement à celui de l'eau distillée et à 4 degrés, pris pour unité.

Mercure	13,596	Eau distillée, à 4 degrés	1,000
Brome	2,966	— à zéro	0,9998
Acide sulfurique monohydrate	1,841	Vin de Bordeaux	0,994
— azotique quadrihydraté	1,42	Esprit de bois	0,928
Sulfure de carbone	1,263	Huile d'olive	0,915
Acide chlorhydrique sixhydrate	1,208	Huile de naphte	0,867
acétique monohydrate	1,063	Essence de térébenthine	0,861
Lait de vache	1,030	Alcool absolu	0,795
Eau de mer	1,026	Éther sulfurique	0,730

108. **Usage des tables des poids spécifiques.** — Les tables des poids spécifiques présentent de nombreuses applications. En minéralogie, elles fournissent un caractère distinctif pour reconnaître les espèces minérales d'après leur densité. Elles servent encore à trouver le poids d'un corps dont le volume est connu, ou réciproquement, à calculer le volume lorsque le poids est donné.

ı effet, on a vu (103) qu'entre le poids relatif P d'un corps, son
ɜ spécifique D et son volume V, il existe la relation $D = \frac{P}{V}$.
$= VD$, qui sert à trouver une des quantités P, V, D, quand
ɔnnait les deux autres, mais toujours à la condition que les
ɜ étant exprimés en grammes ou en kilogrammes, les volumes
ient en centimètres ou en décimètres cubes.

ARÉOMÈTRES A VOLUME VARIABLE

9. Différentes espèces d'aréomètres. — Les aréomètres de
olson et de Fahrenheit sont dits à *volume constant et à poids*
able, parce qu'on les fait toujours plonger de la même quan-
en y ajoutant des poids qui varient avec les solides ou les
des sur lesquels on expérimente. Or on construit aussi des
mètres *à volume variable et à poids constant;* c'est-à-dire
s n'ont pas de point d'affleurement fixe et conservent toujours
ème poids. Ces instruments, nommés *pèse-sels, pèse-acides,*
-liqueurs, ne sont point destinés à mesurer les poids spéci-
s, mais à faire connaître si les dissolutions salines, les acides,
lcools sont plus ou moins concentrés.

10. Aréomètre de Baumé. — Baumé, pharmacien à Paris,
t en 1804, a construit un aréomètre à poids constant, dont
ge est très-répandu. C'est un flotteur de verre, formé d'une
AB (fig. 80), à laquelle est soudée une boule remplie d'air, et à
-ci une boule plus petite, pleine de mercure, qui sert de lest.
y a deux modes de graduer cet instrument, suivant qu'il doit
ger dans des liquides plus denses que l'eau ou moins denses.
s le premier cas, on en règle le poids de manière que, dans
ı distillée et à 4 degrés, il plonge à peu près jusqu'à l'extré-
ı supérieure de sa tige, en un point A, où l'on marque zéro.
r achever la graduation, on fait une dissolution de 85 parties
ı, en poids, et 15 de sel marin. Cette dissolution étant plus
e que l'eau pure, l'appareil n'y plonge que jusqu'à un point B,
'on marque 15. Partageant enfin l'intervalle des points A et B
5 parties égales, et continuant les divisions jusqu'au bas de
ge, l'instrument est gradué. Les divisions sont marquées sur
bande de papier placée dans l'intérieur de la tige.

aréomètre ainsi construit ne peut être employé que pour les
ides plus denses que l'eau, tels que les acides et les dissolu-
ı salines; c'est en même temps un pèse-acides et un pèse-sels.
r les liquides moins denses que l'eau, le zéro devant se trou-
au bas de la tige, la graduation est changée. Baumé a pris

pour zéro le point d'affleurement dans une dissolution de 90 d'eau distillée, en poids, et de 10 de sel marin, et il a marqué 10 au point d'affleurement dans l'eau distillée. Divisant l'intervalle de ces deux points en dix parties égales que l'on continue jusqu'au sommet de la tige, l'appareil est gradué : c'est le pèse-liqueurs.

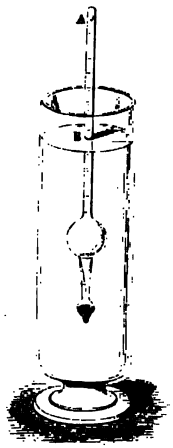


Fig. 80 (h = 26).

Les deux aréomètres que nous venons de décrire sont gradués d'une manière tout à fait arbitraire, et n'indiquent ni les densités des liquides ni les quantités de sel dissoutes. Cependant ils sont avantageusement employés pour reconnaître quand une dissolution saline ou acide a été portée à un point de concentration déterminé. En un mot, ils offrent des points de repère à l'aide desquels on reproduit rapidement des mélanges ou des dissolutions dans des proportions données, non pas avec précision, mais avec une approximation suffisante dans un grand nombre de cas. Par exemple, dans la fabrication des sirops ordinaires, on a constaté que le pèse-sels de Baumé doit marquer 35, à froid, dans un sirop bien confectionné. C'est donc là, pour le fabricant, un instrument facile à consulter pour le degré de concentration de son sirop. De même, dans l'eau de mer, à la température de 22 degrés, le pèse-sels de Baumé marque 3, ce qui donne une indication pour les bains salés ordonnés dans certaines affections.

111. **Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.** — L'alcoomètre de Gay-Lussac est un instrument destiné à mesurer la *force* des liquides spiritueux, à 15 degrés, c'est-à-dire *le nombre de centièmes d'alcool pur, en volume, que contiennent ces liquides à cette température.*

La forme de l'alcoomètre est entièrement celle de l'aréomètre de Baumé (fig. 80); mais sa graduation, qui est faite à 15 degrés, est différente. L'échelle placée sur la tige est divisée en 100 parties, dont chacune représente un centième d'alcool en volume; la division 0 correspond à l'eau pure, et la division 100 à l'alcool absolu. Plongé dans un liquide spiritueux à la température de 15 degrés, l'alcoomètre en donne immédiatement la force. Par exemple, si, à 15 degrés, l'alcoomètre s'enfonce dans une eau-de-vie jusqu'à la division 48, cela indique que cette eau-de-vie contient 48 centièmes de son volume d'alcool pur et le reste d'eau;

ent, et au point d'affleurement on marque 95. On vide alors
ivette, on y verse 90 d'alcool, et l'on achève encore de rem-
squ'à 100 avec de l'eau distillée, ce qui donne un mélange
ant 90 pour 100 d'alcool absolu; et ainsi de suite de 5 en 5.
nt soin de plonger chaque fois l'instrument dans les diffé-
mélanges, et de marquer successivement sur la tige 90, 85.
Divisant enfin les intervalles de 5 en 5, en cinq parties
, l'instrument est gradué.
nporte d'observer que, l'alcoomètre étant gradué à 15 de-
ce n'est qu'à cette température que ses indications sont pré-
A des températures plus hautes ou plus basses, les liquides
tant ou se contractant, l'alcoomètre s'enfonce plus ou moins,
-dire que la chaleur altère à la fois et le volume du liquide
ieux et les indications de l'alcoomètre; de là deux causes
ur qui sont de même sens, et qui, réunies, peuvent s'élever
de 12 pour 100 de la valeur du liquide, de zéro à 30 degrés.
upprimer ces deux causes d'erreur, Gay-Lussac a construit
blés qui contiennent, dans une colonne verticale, les tempé-
s de zéro à 30 degrés, et, dans une colonne horizontale, les
; de l'alcoomètre de zéro à 100. Puis, de même que dans la
de multiplication ordinaire, au point de rencontre de la
ale abaissée de la case qui contient les degrés alcoomé-
s avec l'horizontale qui part de la case où sont les degrés
ermomètre, se trouve le nombre qui indique la richesse
du liquide spiritueux. Par exemple, un semblable liquide

de ces substances l'alcool du vin, l'alcoomètre devient applicable. En traitant de la distillation, nous dirons comment on parvient ainsi, à l'aide d'un petit alambic construit par M. Salleron, à déterminer la proportion d'alcool contenue dans un vin donné (368).

112. **Pèse-sels gradués sur le principe de l'alcoomètre centésimal.** — On construit aussi des pèse-sels gradués sur le principe de l'alcoomètre centésimal ; c'est-à-dire qu'ils font connaître la quantité, en poids, de tel ou tel sel contenu dans une dissolution. Le zéro correspondant à l'eau pure, leur graduation se forme en faisant dissoudre 5, 10, 15, 20..... grammes du sel donné dans 95, 90, 85, 80..... grammes d'eau, jusqu'à saturation de la dissolution. Plongeant l'instrument successivement dans ces dissolutions, on marque 5, 10, 15, 20..... aux différents points d'affleurement, et on divise chaque intervalle en 5 parties égales.

Ces instruments offrent cet inconvénient, qu'il faut un pèse-sels spécial pour chaque espèce de sel. Celui qui aurait été gradué pour l'azotate de potasse, par exemple, ne donnerait que des indications complétement fausses dans une dissolution de carbonate de potasse ou de tout autre sel.

On construit sur le même principe des *pèse-lait*, des *pèse-vin*, destinés à mesurer la quantité d'eau que la fraude peut avoir introduite dans ces liquides ; mais ces instruments ne présentent pas une utilité réelle, parce que les densités du lait et du vin étant très-variables, même lorsque ces liquides sont parfaitement naturels, on pourrait attribuer à la fraude ce qui serait dû uniquement à la mauvaise qualité naturelle du lait ou du vin. Plusieurs médecins font aussi usage de *pèse-urine*, fondés sur le même principe.

Fig. 81.

113. **Densimètres.** — Les *densimètres* sont des aréomètres gradués de manière à faire connaître la densité relative d'un liquide d'après le degré dont ils s'y enfoncent. Nous ne décrirons ici que celui de Gay-Lussac.

Le *densimètre* ou *volumètre* de Gay-Lussac est entièrement semblable à l'aréomètre de Baumé : il n'en diffère que par la graduation, qui varie selon que l'appareil est destiné aux liquides plus denses ou moins denses que l'eau. Dans le premier cas, on le leste de manière que dans l'eau pure il plonge jusqu'en un point A (fig. 81) situé à l'extrémité supérieure de la tige. Choisissant ensuite un liquide dont la densité soit connue et plus grande que celle de l'eau dans le rapport de 4 à 3, par exemple, on y plonge l'appareil, qui n'entre plus qu'à un certain point B de la tige. Or si l'on représente par V et v les volumes immergés respectivement dans l'eau et dans le second liquide, ces volumes étant en raison inverse des densités de ces liquides (99), on a $\frac{V}{v} = \frac{4}{3}$; d'où $v = \frac{3}{4}V$.

e on représente par 100 le volume V, le volume v le sera par 75. En
nce on inscrit respectivement aux points A et B les nombres 100 et 75;
e AB étant, d'après la valeur de v, le quart de V, on partage la dis-
l en 25 parties égales, et chacune de ces parties est $\frac{1}{25}$ de AB, ou $\frac{1}{100}$
st-à-dire du volume immergé dans l'eau pure. Enfin on continue les di-
usqu'à la partie inférieure de la tige, celle-ci devant être exactement
diamètre dans toute sa longueur.

osé, pour connaître la densité d'un liquide, de l'acide sulfurique par
, il suffit d'y plonger le densimètre, et s'il affleure à la 54e division,
que que le volume du liquide déplacé est représenté par 54, celui du
d'eau V l'étant par 100. Or, tout corps flottant déplaçant un poids de
gal au sien (99), le volume d'eau V ou 100, et le volume d'acide sul-
54, ont le même poids, celui de l'instrument; mais, à poids égal, les
de deux corps sont en raison inverse de leurs densités; donc, si l'on re-
par x la densité de l'acide sulfurique, celle de l'eau étant 1, on a

$$\frac{x}{1}=\frac{100}{54}, \quad \text{d'où} \quad x=\frac{100}{54}=1,85.$$

lensimètre est destiné à des liquides moins denses que l'eau, il faut le
manière que le point 100, correspondant à l'eau distillée, se trouve à la
férieure de la tige. On fixe ensuite à l'extrémité supérieure de celle-ci
qui soit le quart de celui de l'instrument. Or, le poids de l'instrument,
était seul, ayant été représenté par 100, son poids total actuel est 125.
t donc ce dernier nombre en regard du nouveau point d'affleurement,
divise l'intervalle des points 100 et 125 en 25 parties égales que l'on
jusqu'au sommet de la tige.

* CHAPITRE II

CAPILLARITÉ

hénomènes capillaires. — Il se produit, au contact des solides et
des, une série de phénomènes auxquels on a donné le nom de *phénomènes*
res, parce qu'ils s'observent surtout dans les tubes d'un diamètre assez
ur être comparable à celui d'un cheveu. La partie de la physique qui a
ject l'étude des phénomènes capillaires se désigne sous le nom de *capil-*
xpression qui s'applique aussi à la force qui produit ces phénomènes.

ets de la capillarité sont très-variés; mais, dans tous les cas, ils sont
attraction mutuelle des molécules liquides entre elles, et à celle qui
entre ces molécules et les corps solides. Tels sont les phénomènes suivants:
n'on plonge un corps dans un liquide qui soit de nature à le mouiller,
e, comme s'il n'était plus soumis aux lois de l'hydrostatique, est soulevé
du corps solide, et sa surface, cessant d'être horizontale, prend une
oncave (fig. 82).

u contraire, le corps plongé n'est pas mouillé par le liquide, ce qui a
r le verre en contact avec le mercure, le liquide, au lieu de s'élever, se
, et sa surface prend une forme convexe autour du corps plongé, comme
re la fig. 83. La surface du liquide affecte la même concavité ou con-
ur les bords du vase qui le contient, suivant qu'il en mouille ou n'en
pas les parois.

hénomènes deviennent plus apparents *lorsque*, au lieu d

pleine, on plonge dans le liquide des tubes de verre creux d'un petit c
mètre. Selon que ces tubes sont ou ne sont pas mouillés par le liquide, il se p
duit une ascension ou une dépression d'autant plus grandes, que le diamètre
plus petit (fig. 84 et 85).

Lorsque les tubes sont mouillés par le liquide, la surface de celui-ci pr

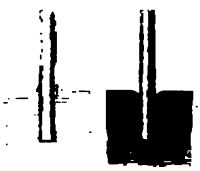


Fig. 82. Fig. 83.

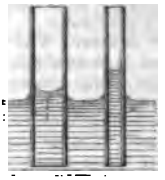


Fig. 84.

Fig. 85.

la forme d'un segment hémisphérique concave qu'on nomme *ménisque con*
(fig. 84); s'ils ne sont pas mouillés, on a *un ménisque convexe* (fig. 85),

115. **Lois de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires.** Lorsque les parois des tubes sont d'avance mouillées par un liquide, G
Lussac a vérifié par l'expérience les deux lois suivantes :

1° *L'ascension varie avec la nature du liquide et avec la température; e*
elle est indépendante de la substance des tubes et de l'épaisseur de leurs pa

2° *Pour un même liquide, l'ascension est en raison inverse du diamètre*
tube, tant que ce diamètre ne dépasse pas 2 millimètres.

Cette seconde loi est connue sous le nom de *loi de Jurin*, du nom de c
qui, le premier, l'a fait connaître.

Toutes ces lois se vérifient dans le vide comme dans l'air; mais Wolf a
voir que, lorsque la température augmente, l'ascension de l'eau dans les t
diminue, et peut même devenir nulle ou se changer en dépression.

116. **Loi de la dépression dans les tubes capillaires.** — Pour le
quides qui ne mouillent pas les tubes, comme le mercure dans le verre, la
pression est encore en raison inverse du diamètre des tubes; mais pour des t
de même diamètre, cette dépression varie avec la nature des tubes. Par exem
tandis que, dans un tube de fer de 1 millimètre de diamètre, la dépressio
1mm,226, dans un tube de platine de même diamètre elle n'est que de 0mm,
La dépression dépend encore de la hauteur du ménisque convexe du merc
hauteur qui varie, à diamètre égal, avec la pureté du mercure, et suivant
le ménisque s'est formé pendant le mouvement ascendant ou descendant d
colonne mercurielle, il est plus haut dans le premier cas que dans le second.

117. **Lois de l'ascension et de la dépression entre deux lames p**
lèles ou inclinées. — Des phénomènes analogues à ceux que présentent
tubes capillaires se produisent entre deux corps de forme quelconque plo
dans un liquide, lorsqu'ils sont suffisamment rapprochés. Par exemple, si
plonge dans l'eau deux lames de verre parallèles, assez peu distantes pour
les deux courbures formées à leur contact par le liquide viennent se joindre
observe : 1° que *l'eau s'élève régulièrement entre les deux lames, en raison in*
de l'intervalle qui les sépare; 2° que *la hauteur de l'ascension, pour un interv*
donné, est la moitié de celle qui aurait lieu dans un tube dont le diam
serait égal à cet intervalle.

Si les lames parallèles plongent dans le mercure, il y a dépression, mais
vant les mêmes lois.

Deux lames de verre AB et AC étant inclinées entre elles (fig. 86), si on
plonge dans un liquide qui les mouille, de manière que leur ligne de contact

verticale, le liquide s'élève au sommet de l'angle des deux lames, et sa surface, du point le plus haut au point le plus bas, affecte la forme de la courbe connue en géométrie sous le nom d'*hyperbole équilatère*.

Lorsque la ligne de contact des deux lames est horizontale, comme cela aurait

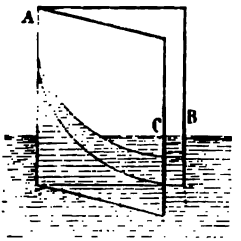


Fig. 86.

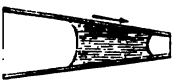


Fig. 87.

Fig. 88.

lieu dans les lames des figures 87 et 88, si on les prolongeait, et lorsqu'en même temps l'angle qu'elles forment est très-petit, une goutte d'eau placée entre elles s'arrondit à ses deux extrémités en ménisque concave (fig. 87), et se précipite vers le sommet de l'angle. Si, au contraire, le liquide ne mouille pas les lames, comme avec le mercure, la goutte s'arrondit en se terminant en ménisque convexe (fig. 88), et elle s'éloigne du sommet de l'angle.

118. Attractions et répulsions qui résultent de la capillarité. — C'est à la capillarité que sont dues les attractions et les répulsions qu'on observe entre les corps qui flottent à la surface des liquides; attractions et répulsions qui sont soumises aux lois suivantes :

Lorsque deux corps flottants sont mouillés tous les deux par le liquide, par exemple deux balles de liége dans l'eau, il se produit une forte attraction, aussitôt que les deux balles sont assez rapprochées pour qu'il n'existe plus entre elles de surface plane.

Si les corps ne sont mouillés ni l'un ni l'autre, comme deux balles de cire sur l'eau, on observe encore une vive attraction aussitôt que celles-ci sont placées dans la même condition que ci-dessus.

Enfin si, des deux corps flottants, l'un est mouillé par le liquide et que l'autre ne le soit pas, comme une balle de liége et une balle de cire dans l'eau, on voit les deux balles se repousser au moment où elles sont suffisamment rapprochées pour que les deux courbures contraires du liquide se trouvent en contact.

Tous les phénomènes qui viennent d'être décrits dépendant de la courbure concave ou convexe que prend la surface du liquide au contact des corps, il nous reste à faire connaître la cause qui détermine la forme de cette courbure.

119. Cause de la courbure des surfaces liquides au contact des solides. — La forme de la surface d'un liquide au contact d'un corps solide provient du rapport qui existe entre l'attraction du solide sur le liquide, et l'attraction du liquide sur lui-même.

En effet, soit une molécule liquide m (fig. 89) en contact avec un corps solide. Cette molécule est soumise à trois forces : la pesanteur, qui la sollicite suivant la verticale mP; l'attraction du liquide, qui agit dans une direction mF; et l'attraction de la lame, qui s'exerce dans la direction mn. Or, selon les intensités respectives de ces forces, leur résultante peut prendre les trois positions suivantes :

1° Cette résultante est dirigée suivant la verticale mR (fig. 89); alors la surface en m est plane et horizontale, car, d'après les conditions d'équilibre des liquides (88), leur surface doit être perpendiculaire à la force qui les sollicite.

2° La force n augmentant, ou F diminuant, la résultante R est dirigée

dans l'angle mmP (fig. 90); dans ce cas, la surface prend une direction inclinée perpendiculaire à mR, et elle est concave.

3° La force F augmentant ou n diminuant, la résultante R prend la direction mR (fig. 91), dans l'angle PmF, et la surface, se disposant perpendiculairement à cette direction, devient convexe.

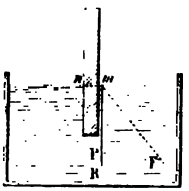


Fig. 89.

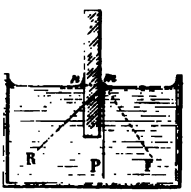


Fig. 90.

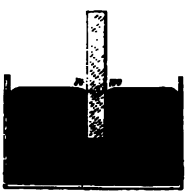


Fig. 91.

Le calcul montre que, dans le premier cas, l'attraction du liquide sur lui-même est double de celle du solide sur le liquide; dans le second cas, l'attraction du liquide est plus petite que le double de celle du solide; dans le troisième, elle est plus grande.

120. **Influence de la courbure du liquide sur les phénomènes capillaires.** — C'est de la forme concave ou convexe du ménisque que dépend l'ascension ou la dépression d'un liquide dans un tube capillaire. En effet, si l'on considère un ménisque concave *abcd* (fig. 92), les molécules liquides de ce ménisque étant soutenues en équilibre par les forces qui les sollicitent (119), elles n'exercent aucune pression sur les couches inférieures; de plus, elles agissent, en

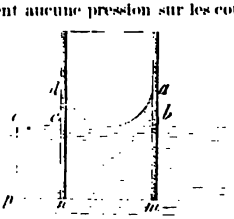


Fig. 92.

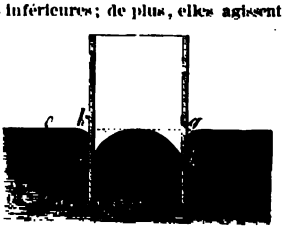


Fig. 93.

vertu de l'attraction moléculaire, sur les couches inférieures les plus voisines; d'où il résulte que, sur une couche quelconque mn, considérée dans l'intérieur du tube, la pression est moindre que s'il n'y avait point de ménisque. Par conséquent, d'après les conditions d'équilibre des liquides (89), le liquide doit s'élever dans le tube jusqu'à ce que la pression intérieure sur la couche mn soit égale à la pression op, qui s'exerce extérieurement sur un point quelconque p de la même couche.

Dans le cas où le ménisque est convexe (fig. 93), l'équilibre existe encore, en vertu des forces moléculaires qui sollicitent le liquide; mais les molécules qui occuperaient l'espace *ghik*, s'il n'y avait pas d'action capillaire, étant supprimées, n'agissent plus par attraction sur les molécules inférieures. Il résulte de là que la pression, sur une tranche quelconque mn, est plus grande, dans l'intérieur du tube, que si l'espace *ghik* était rempli; car les forces moléculaires dont il s'agit sont beaucoup plus intenses que la pesanteur. Le liquide doit donc s'abaisser dans le tube jusqu'à ce que la pression intérieure sur la tranche mn soit la même qu'en un point quelconque p de cette tranche.

La théorie de la capillarité, une des plus difficiles de la physique, ne peut être traitée d'une manière complète que par l'analyse mathématique ; aussi a-t-elle été étudiée surtout par les mathématiciens, et particulièrement, en France, par Clérault, Laplace, Poisson et M. Quet. Telle que nous venons de la faire connaître, cette théorie rend compte de l'ascension et de la dépression des liquides non-seulement dans les tubes, mais encore entre les lames parallèles ou inclinées (117). Elle explique également les attractions et les répulsions qu'on observe entre les corps flottants (118).

121. **Faits divers dépendant de la capillarité.** — Au nombre des phénomènes qui ont pour cause la capillarité, nous citerons les suivants :

Lorsqu'un tube capillaire est plongé dans un liquide qui le mouille, si on l'en retire avec précaution, on observe que la colonne liquide qui reste suspendue dans le tube est plus grande que l'ascension qui avait lieu lorsque ce tube plongeait. Ceci résulte de ce que le tube entraîne avec lui une goutte liquide qui adhère à sa partie inférieure, et y forme un ménisque convexe dont l'action concourt avec celle du ménisque concave supérieur pour soutenir une colonne plus grande (120).

C'est par la même raison qu'un tube capillaire plongé dans un liquide n'y donne lieu à aucun écoulement, quoique plus court que la colonne liquide qui tend à s'élever dans ce tube. Cela provient de ce qu'à l'instant où le liquide atteint le haut du tube, sa surface supérieure, de concave qu'elle était, devient convexe, et, par conséquent, la pression devenant plus grande que si sa surface était plane, le mouvement ascensionnel s'arrête.

On voit souvent des insectes se maintenir à la surface de l'eau sans y enfoncer. C'est là un phénomène capillaire qui résulte de ce que leurs pattes étant recouvertes d'une matière onctueuse qui les empêche de se mouiller, il se produit autour d'elles une dépression qui soutient ces insectes malgré leur poids, de même que l'eau est soutenue dans les tubes. C'est par une dépression semblable qu'une aiguille fine à coudre, posée doucement sur l'eau, reste à sa surface quand elle est enduite d'une matière grasse, parce qu'alors elle n'est pas mouillée ; mais si elle a été lavée dans l'alcool ou la potasse, elle va au fond.

C'est encore par un effet capillaire que l'huile s'élève dans les mèches des lampes, et qu'il y a pénétration des liquides dans les bois, dans les éponges, et dans tous les corps qui possèdent des pores sensibles (16). Enfin, sous les noms d'endosmose, d'absorption et d'imbibition, nous allons faire connaître de nouveaux phénomènes qui ont une grande analogie avec la capillarité.

CHAPITRE III

DIFFUSION, OSMOSE, ABSORPTION ET DIALYSE DES LIQUIDES

122. **Diffusion des liquides.** — On nomme *diffusion* le mélange spontané de deux liquides, de nature ou de concentration différentes, et sans action chimique l'un sur l'autre.

La diffusion des liquides a été observée, dès le siècle dernier, par Priestley et autres physiciens ; mais ce n'est qu'en 1854 que Graham, à Londres, a étudié avec soin ce genre de phénomènes.

L'appareil dont a fait usage ce savant consiste en un petit bocal A (fig. 94), à large goulot, de $0^{lit},11$ de capacité. Ce bocal étant rempli de la dissolution qu'on veut faire diffuser, par exemple une dissolution saline, on le recouvre d'un obturateur de verre, puis on le plonge dans un récipient de 1 litre de capacité environ, qu'on remplit d'eau distillée jusqu'à ce qu'elle s'élève de 2 à 3 centimètres

au-dessus du bocal A. On enlève ensuite avec précaution l'obturateur, et on laisse le tout au repos, à une température constante, pendant plusieurs jours. Or, remettant l'obturateur et retirant le bocal A, on trouve, en évaporant l'eau du récipient, qu'elle laisse pour résidu une grande partie du sel qui était en dissolution dans le bocal; ce qui fait voir qu'il y a eu diffusion de celui-ci vers l'eau du récipient B.

On rend encore apparent le phénomène de la diffusion par l'expérience suivante : on remplit aux trois quarts une haute éprouvette de verre de teinture de tournesol étendue (fig. 95); puis, avec un entonnoir à long col, on fait arriver lentement de l'acide sulfurique à la partie inférieure. On voit alors la

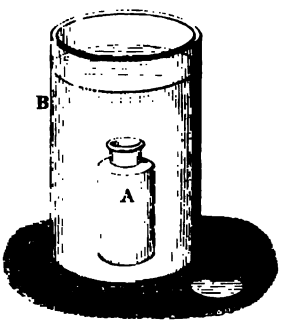


Fig. 94.

Fig. 95.

teinture de tournesol passer graduellement au rouge de bas en haut, et au bout de 48 heures toute la liqueur est rougie. Il y a donc diffusion de l'acide vers le liquide supérieur.

123. **Lois de la diffusibilité des liquides.** — Graham a constaté par l'expérience les lois suivantes sur la diffusibilité des liquides :

1° *En temps égal, la diffusibilité varie d'un liquide à l'autre.* Le liquide le plus diffusible est l'acide chlorhydrique. L'albumine, qui est un des liquides les moins diffusibles, se diffuse 49 fois plus lentement que l'acide chlorhydrique. La faible diffusibilité de l'albumine joue nécessairement un rôle important dans l'économie animale.

2° Avec des dissolutions d'un même sel inégalement concentrées, *la diffusibilité est proportionnelle à la quantité de sel en dissolution;* elle augmente avec la température.

3° Deux liquides, ne réagissant pas chimiquement l'un sur l'autre et inégalement diffusibles, *se séparent en partie lorsqu'on les mélange dans un bocal à diffusion* (fig. 94), le plus diffusible se dégageant le premier.

124. **Osmose, endosmose et exosmose.** — On donne le nom d'*osmose* (impulsion) à la diffusion entre deux liquides séparés par une membrane organique, ou par un diaphragme inorganique poreux. C'est Dutrochet, en France, qui, le premier, en 1826, fit connaître avec détail ce phénomène jusqu'alors fort peu étudié.

L'appareil qui a servi à Dutrochet dans ses recherches a été nommé par lui *endosmomètre;* il consiste en une poche membraneuse surmontée d'un tube de verre un peu long, autour duquel elle adhère hermétiquement au moyen d'une ligature (fig. 96). Cette poche étant remplie d'une dissolution fortement gommée, ou d'un autre liquide plus dense que l'eau, comme le lait, l'albumine, une

ore, on la plonge dans un vase rempli d'eau. Bientôt on re-
iveau s'élève peu à peu dans le tube, à une hauteur qui peut
n décimètres, et qu'il s'abaisse dans le vase où plonge l'endos-
'aut conclure qu'une partie de l'eau pure a passé à travers la mem-
se mélanger au liquide intérieur. On constate, de plus, qu'au
i temps, l'eau dans la-
endosmomètre contient
s'est donc produit un
deux sens. On dit alors
ose pour le liquide dont
nte, et *exosmose* pour
me diminue. Si l'on met
poche membraneuse, et
-ci dans l'eau gommée,
roduit encore de l'eau
mmée, c'est-à-dire que
que le niveau s'élève.
ascension dans l'endos-
rec les différents liqui-
s substances végétales,
st celle qui, à densité
le plus grand pouvoir
toutes les substances
albumine. La gélatine,
possède qu'une force
faible. C'est, en géné-
le le plus dense que se
d'endosmose. Toutefois
font exception, ces li-
rtant, par rapport à
s liquides plus denses.
suivant qu'ils sont plus
s, il y a endosmose de
ou de l'acide vers l'eau.

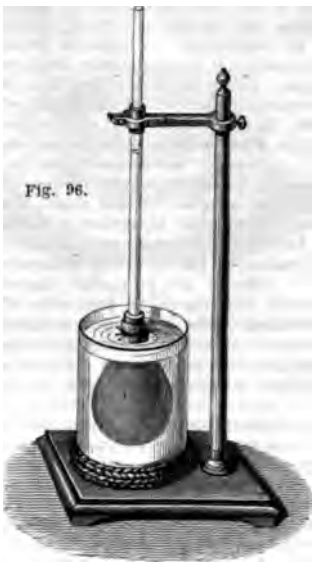


Fig. 96.

nstaté que, pour que les phénomènes d'endosmose se produi-
que les liquides soient hétérogènes et susceptibles de se mélan-
et l'alcool, par exemple, tandis qu'avec l'eau et l'huile il n'y
s deux liquides soient de densités différentes; 3° que la cloison
uides soit perméable au moins à l'un d'eux.
tances végétales et animales sont perméables; quant aux sub-
ues, comme les ardoises, les grès, la porcelaine dégourdie, la
cuite, elles sont d'autant moins perméables qu'elles contien-
e. La terre de pipe, qui est plus alumineuse que la porcelaine,
le; c'est ce qui fait qu'elle happe à la langue.
ames minces inorganiques, le courant est faible, mais peut se
iment. Les membranes organiques, au contraire, se désorga-
ent, et l'endosmose cesse.
plusieurs théories de l'endosmose. Les uns l'ont attribuée à un
e qui se dirigeait dans le même sens que l'endosmose. D'autres
cause du phénomène était une action capillaire jointe à l'affi-
quides. On a admis encore que l'endosmose était due à une
des liquides. Enfin, on a attribué ce phénomène à la plus ou
rméabilité des membranes pour tel ou tel liquide. Graham a
nomènes d'endosmose et d'exosmose par l'inégale adhésion des
e la membrane qui les sépare : celui *qui* la mouille plus facil-

lement pénètre le premier dans ses pores, la traverse et se diffuse en
ou moins rapidement de l'autre côté (122).

125. **Absorption et imbibition.** — Les mots *absorption* et *imbibition*
sique, sont à peu près synonymes : tous les deux indiquent égale
pénétration d'une substance étrangère dans un corps poreux. Toutefois
tion se dit indistinctement en parlant des substances liquides ou
tandis que l'imbibition s'entend spécialement des liquides.

En physiologie, on distingue l'absorption de l'imbibition. Dans l
phénomène, il y a pénétration d'une substance étrangère dans les tissus
vivant, tandis que l'imbibition ne se dit que d'une pénétration dans
poreux privés de vie, soit organiques, soit inorganiques. En un mot, dans
tion, les forces vitales sont mises en jeu ; elles ne le sont pas dans l'imb

126. **Phénomènes d'absorption dans les plantes.** — Dans le rè
tal, l'absorption se fait par toutes les parties des plantes, mais surto
chevelus qui terminent les racines, et par les feuilles. C'est par ce
que sont absorbés, à l'état d'eau, d'acide carbonique et d'ammoniaq
gène, l'hydrogène, le carbone et l'azote nécessaires à la nutrition des

Les liquides et les sels qu'ils tiennent en dissolution sont d'abord abs
les radicelles, par un double phénomène d'endosmose et de capillarité
sève, élaborée par le végétal, augmentant de densité vers les part
rieures, c'est encore un phénomène d'endosmose qui lui donne une
ascendante. Enfin, l'ascension de la sève est, en outre, favorisée par le
tend à se produire dans les parties élevées de la plante par l'effet de
tion par les feuilles. Quant à l'action capillaire, elle ne peut élever le
que dans les cellules inférieures, et ne peut produire de courant.

Le docteur Boucherie, à Bordeaux, a fait une heureuse application d
priété absorbante des végétaux à l'introduction, dans le tissu des bois, de
les uns leur donnent des couleurs plus ou moins vives, et dont les au
mentent leur souplesse et leur ténacité, ou les rendent moins combust

127. **Phénomènes d'absorption chez les animaux.** — Chez les
inférieurs, dont les tissus ne sont formés que de cellules, tout se passe
dans les végétaux, par imbibition et par endosmose. L'imbibition par
quelques-uns de ces animaux se nourrissent est une véritable endosmo

Chez les animaux supérieurs il y a absorption. Par exemple, la garan
intérieurement, pénètre les os et les colore en rouge. De même, si m
est en contact avec une surface cutanée, dénudée de son épiderme,
une membrane muqueuse, ces surfaces étant très-vasculaires, le liqui
dans les vaisseaux par un effet d'endosmose, ce qui constitue l'absorpt

Plus une substance est liquide, plus elle est facilement absorbée. T
pour qu'il y ait absorption des liquides, il est nécessaire qu'ils moui
membranes. En effet, les graisses, qui ne les mouillent pas, ne sont pa
bées ; mais M. Cl. Bernard a reconnu qu'elles le sont facilement, étan

embranes et les cloisons poreuses; les colloïdes, au contraire, sont
ipides et ont peu de tendance à la diffusion.
de Graham pour la dialyse est un endosmomètre modifié auquel
le nom de *dialyseur*. Il se compose d'une lame de gutta-percha
m cylindre de 25 centimètres de diamètre, de 5 de hauteur, et fermé
r une membrane, de manière à former une sorte de tamis.
nce que Graham préférait comme membrane dialytique est le *pa-*
min; on sait qu'on nomme ainsi du papier non collé qu'on a soumis

Fig. 97.

Fig. 98.

immersion dans l'acide sulfurique. Ce papier s'hydrate, s'allonge
anslucide. Comme il est encore très-poreux, il est bon de l'enduire
couche d'albumine qu'on fait coaguler par la chaleur. Ce papier
é, on l'applique sur le cylindre de gutta dont nous avons parlé ci-
le fixe par une ligature (fig. 97).
ur ainsi préparé, on y verse le liquide qu'on veut analyser sur une
12 millimètres au plus, puis on le met flotter dans un vase plus
nant une quantité d'eau distillée suffisante pour que la diffusion
duire complétement à travers le papier-parchemin, environ de 4 à
lume du mélange qui est dans le dialyseur (fig. 98). Le cristalloïde
s celui-ci se sépare alors à peu près complétement, au bout de 24
, des matières auxquelles il est mélangé. Par exemple, l'acide arsé-
st très-diffusible, étant mélangé avec des matières organiques, s'en
acilement, et, en réduisant le liquide extérieur par évaporation, on
de arsénieux presque exempt de matières étrangères, et assez con-
donner un précipité jaune avec l'acide sulfhydrique. Règle générale,
des se séparent très-facilement des colloïdes.
e a reçu d'importantes applications en pharmacie et en chimie in-
f. Dubrunfaut l'a appliquée à l'épuration des mélasses un an avant
aux de Graham fussent publiés.

LIVRE IV

DES GAZ

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES GAZ, ATMOSPHÈRE, BAROMÈTRES

129. **Caractères physiques des gaz.** — Les *gaz*, ou *fluides aériformes*, sont des corps dont les molécules possèdent une mobilité parfaite, et sont dans un état constant de répulsion qu'on désigne sous les noms d'*expansibilité*, de *tension* ou de *force élastique*, d'où les gaz prennent eux-mêmes le nom de *fluides élastiques*.

On divise les fluides élastiques en deux classes : les *gaz permanents*, ou *gaz* proprement dits, et les *gaz non permanents*, ou *vapeurs*. Les premiers persistent à l'état aériforme, à quelque pression et à quelque abaissement de température qu'on les soumette ; ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone et le gaz des marais. Les gaz non permanents, au contraire, passent plus ou moins facilement à l'état liquide, soit par un excès de pression, soit par le refroidissement. Toutefois cette distinction n'est pas rigoureuse ; car un grand nombre de gaz qu'on regardait comme permanents ont été liquéfiés par Faraday et autres physiciens, et l'on doit admettre que ceux qui jusqu'ici n'ont pu être liquéfiés, le seraient si on les soumettait à une pression et à un froid suffisants. C'est pourquoi l'on donne, en général, le nom de *gaz* aux corps qui, dans des conditions habituelles de température et de pression, ne se présentent qu'à l'état aériforme, tandis qu'on entend par *vapeur* l'état aériforme que prennent, sous l'influence de la chaleur, les corps qui, comme l'eau, l'alcool, l'éther, sont liquides aux pressions et aux températures ordinaires.

Les gaz connus en chimie sont au nombre de trente-quatre, dont quatre sont simples : ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le chlore ; sept seulement se rencontrent libres dans la nature, savoir : l'oxygène, l'azote, l'acide carbonique, le protocarbure et le bicarbure d'hydrogène, l'ammoniaque et l'acide sulfureux. Les autres ne s'obtiennent que par des réactions chimiques.

e expansive des gaz. — La force expansive des gaz. · leur tendance à ours un volume plus émontre par l'expé- ınte. On place, sous de la machine pneu- e vessie à robinet qui petite quantité d'air, eu soin de mouiller dre plus flexible. Il , équilibre entre la ıue de l'air qui est pient et celle de l'air ıns la vessie ; mais ı l'on commence à le, la pression qui la vessie s'affaiblit, se gonfle de plus en e si l'on soufflait dedans (fig. 99), ce qui prouve la ıse du gaz qu'elle contient. Lorsqu'on fait ensuite ren- érieur au moyen d'un robinet destiné à cet usage, on e, comprimée par le gaz rentrant, reprendre son vo- lif. On constate de la même manière la force expansive gaz.

Fig. 99.

émontré plus tard que la force élastique des gaz est

tiquement (fig. 100). On pèse d'abord ce ballon plein d'air; puis, après y avoir fait le vide au moyen de la machine pneumatique, on le pèse de nouveau et l'on trouve que la seconde pesée est de plusieurs grammes plus faible que la première, ce qui fait connaître le poids de l'air retiré du ballon.

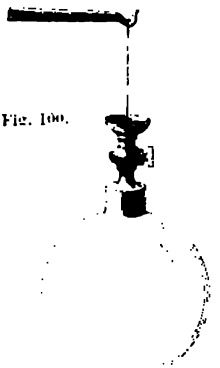


Fig. 100.

On trouve par ce procédé, en jaugeant d'avance le volume du ballon en litres, qu'un litre d'air pur, à la température de zéro et sous la pression atmosphérique $0^{m}.76$ (142), pèse $1^{gr}.293$, ou approximativement $1^{gr}.3$. Un litre d'hydrogène, qui est le plus léger des gaz, pèse $0^{gr},09$, c'est-à-dire environ 14 fois et demie moins que l'air; un litre de gaz iodhydrique, qui est le plus dense des gaz, pèse $5^{gr}.745$.

133. **Densité de l'air par rapport à l'eau.** — Un litre d'air pesant $1^{gr}.293$, et un litre d'eau 1000^{gr}, si l'on divise le premier poids par le second, on a pour quotient le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau (103), quotient qui est 0.001293. Ce nombre étant 773 fois plus petit que l'unité, qui est le poids spécifique de l'eau, on en conclut que, à volume égal, l'eau pèse 773 fois plus que l'air, celui-ci étant à la température de zéro et à la pression atmosphérique $0^{m}.76$, et l'eau à la température de 4 degrés.

Le nombre 0.001293, qui représente le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, trouve son application dans de nombreux problèmes; il est facile à retenir, puisqu'il se déduit du nombre $1^{gr}.293$, en reculant la virgule de trois rangs vers la gauche.

134. **Pressions exercées par les gaz.** — Les gaz exercent sur les molécules de leur masse et sur les parois des vases qui les contiennent des pressions qu'on peut considérer sous deux points de vue : 1° en faisant abstraction de la pesanteur; 2° en tenant compte de l'action de cette force.

En effet, étant donnée une masse gazeuse en équilibre dans un vase, si l'on fait abstraction de son poids pour n'avoir égard qu'à sa force expansive, les pressions dues à cette force se transmettent avec la même intensité sur tous les points des parois et de la masse fluide; car la force répulsive qui s'exerce entre les molécules est la même dans tous les points et agit également dans toutes les directions, ce qui est une conséquence de l'élasticité et de la fluidité parfaites des gaz. Mais si l'on a égard à l'action de la pesanteur, cette force fait naître des pressions soumises entièrement

incipe de Pascal et principe d'Archimède applicables aux
uisque les gaz transmettent les pressions suivant les
ois que les liquides, on prévoit qu'ils doivent, comme
être soumis au principe de Pascal, c'est-à-dire trans-
s pressions en tous sens, avec la même intensité, sur les
s vases qui les contiennent (81). En effet, lorsqu'on com-
gaz en vase clos, des manomètres fixés en différents
s parois du vase accusent partout la même pression.
raisonnement identique avec celui qui a déjà été fait
liquides (96), on reconnaît que *le principe d'Archimède
applicable aux gaz*; c'est-à-dire que tout corps plongé
masse gazeuse y supporte, de bas en haut, une poussée
poids du gaz qu'il déplace, principe qui sera bientôt
expérimentalement à
baroscope (173).

Transvasement des gaz. me que les liquides, les
ent être transvasés d'un
un autre. L'expérience
ès-bien avec l'acide car-
qui est beaucoup plus
e l'air. On commence
lir une cloche de ce gaz.
eillant sur une cuve à
s, prenant une seconde

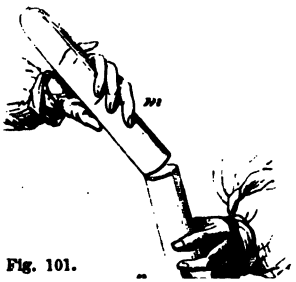


Fig. 101.

la propriété de l'acide carbonique d'éteindre les corps en combustion. En effet, avant l'expérience, une bougie allumée brûle dans la cloche *n* et s'éteint dans l'autre, tandis qu'après l'expérience c'est le contraire qui a lieu.

137. **Atmosphère, sa composition.** — On donne le nom d'*atmosphère* à la couche d'air qui enveloppe notre globe et est emportée avec lui dans l'espace.

L'air était regardé par les anciens comme un des quatre éléments qu'ils admettaient. La chimie moderne a fait voir qu'il est un mélange d'azote et d'oxygène, dans le rapport, en volume, de 20,80 d'oxygène à 79,20 d'azote. En poids, sa composition est de 23,01 d'oxygène pour 76,99 d'azote.

On trouve aussi, dans l'atmosphère, de la vapeur d'eau, en quantité variable suivant la température, les saisons, les climats et la direction des vents. Enfin, l'air contient de 3 à 6 dix-millièmes de gaz acide carbonique en volume.

L'acide carbonique de l'air provient de la respiration des animaux, des combustions et de la décomposition des substances organiques. Malgré cette production permanente d'acide carbonique à la surface du globe, la composition de l'atmosphère ne paraît pas se modifier; cela provient de ce que, dans l'acte de la végétation, les parties vertes des végétaux décomposent l'acide carbonique sous l'influence de la lumière solaire, s'assimilent son carbone, et restituent ainsi à l'atmosphère l'oxygène qui lui est constamment enlevé par la respiration des animaux et par les combustions.

138. **Pression et hauteur de l'atmosphère.** — L'air étant pesant, si l'on conçoit l'atmosphère partagée en tranches horizontales, les couches supérieures pressent les couches inférieures, et les compriment. Cette pression décroissant avec le nombre des tranches, l'air est d'autant moins comprimé, et par suite plus raréfié, qu'on s'élève davantage dans l'atmosphère.

En vertu de la force expansive de l'air, il semble que les molécules de l'atmosphère devraient se répandre indéfiniment dans les espaces planétaires. Mais, par l'effet même de la dilatation, la force expansive de l'air décroît de plus en plus; elle est, en outre, affaiblie par la basse température des hautes régions de l'atmosphère; en sorte qu'il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force expansive des molécules de l'air et l'action de la pesanteur qui les sollicite vers le centre de la terre, d'où l'on conclut que l'atmosphère doit être limitée.

D'après le poids de l'atmosphère, son décroissement de densité et l'observation des phénomènes crépusculaires, on a évalué sa

hauteur de 60 à 70 kilomètres. Au delà serait un air extrêmement raréfié, et à 100 kilomètres environ un vide absolu.

D'après les observations faites dans la zone intertropicale sur es arcs crépusculaires et sur la limite de la polarisation atmosphérique, M. Liais trouve que la hauteur de l'atmosphère est de 20 à 340 kilomètres, hauteur qui diffère considérablement de elle admise jusqu'ici. L'observation des hauteurs auxquelles apparaissent les *bolides*, corps errants qui s'enflamment en pénétrant dans l'atmosphère, conduit pour cette dernière à une hauteur voisine de celle assignée par M. Liais.

Puisqu'on a reconnu ci-dessus (132) qu'un litre d'air pèse $1^{gr},293$, on conçoit que l'ensemble de l'atmosphère doit exercer, la surface du globe, une pression considérable. On démontre 'existence de cette pression par les expériences suivantes.

139. **Crève-vessie, hémisphères de Magdebourg.** — Le *crève-essie* consiste en un manchon de ıre fermé hermétiquement, à sa artie supérieure, par une membrane e baudruche. L'autre extrémité, dont s bords sont bien dressés et graisés de suif, s'applique sur la platine e la machine pneumatique (fig. 102). ussitôt qu'on commence à faire le ide dans ce manchon, la membrane déprime sous la pression atmosphérique qu'elle supporte; et bientôt elle crève avec une vive détonaon causée par la rentrée subite de air.

Fig. 102.

Les *hémisphères de Magdebourg*, us à Otto de Guéricke, et ainsi ommés de la ville où ils furent inentés, consistent en deux hémisphères creux, de cuivre, de 10 12 centimètres de diamètre (fig. 103). Leurs bords sont garnis 'une rondelle annulaire de cuir, enduite de suif avec soin, afin e tenir le vide lorsque ces bords sont en contact. L'un des hémiphères porte un robinet qui peut se visser sur la machine pneuatique, et l'autre un anneau qui sert de poignée pour le saisir le tirer. Tant que les deux hémisphères comprennent entre ux de l'air, on les sépare sans difficulté, car il y a équilibre entre force expansive de l'air intérieur et la pression de l'atmosphère; ais une fois que le vide est fait, on ne peut plus les séparer sans n puissant effort, dans quelque position qu'on tienne l'appareil

(fig. 104), ce qui fait voir que la pression atmosphérique s'exerce en tous sens.

Fig. 103.

Fig. 104.

MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE ; BAROMÈTRES

140. **Expérience de Torricelli.** — Les deux expériences précédentes démontrent l'existence de la pression atmosphérique, mais n'en font pas connaître la valeur. La suivante, faite, pour la première fois, en 1643, par Torricelli, disciple de Galilée, donne la mesure exacte du poids de l'atmosphère.

On prend un tube de verre long de 80 centimètres au moins, d'un diamètre intérieur de 6 à 7 millimètres, et fermé à l'une de ses extrémités. Ayant posé ce tube dans une position verticale CD (fig. 105), on le remplit entièrement de mercure ; puis, fermant l'ouverture C avec le pouce, on retourne le tube et on plonge l'extrémité ouverte dans une cuvette pleine de mercure. Retirant alors le doigt, la colonne mercurielle s'abaisse aussitôt de plusieurs centimètres, et conserve une hauteur AB qui, au niveau des mers, est, en moyenne, de 76 centimètres.

C'est alors la pression atmosphérique qui soutient le mercure dans le tube. En effet, le tube et la cuvette représentant deux

vases communiquants, on sait que l'équilibre ne s'établit qu'autant que la pression est la même sur tous les points d'une même tranche horizontale (89). Or, sur la surface libre du mercure dans la cuvette, c'est la pression atmosphérique qui s'exerce; tandis qu'au même niveau, à l'intérieur du tube, c'est la pression due à la colonne de mercure qui y reste en suspension, et c'est bien uniquement cette pression, puisque le vide s'est formé en A au-dessus du mercure. Mais, puisqu'il y a équilibre, les pressions intérieure et extérieure sont égales; d'où l'on conclut que la pression atmosphérique équivaut, à surface égale, à celle exercée par une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur.

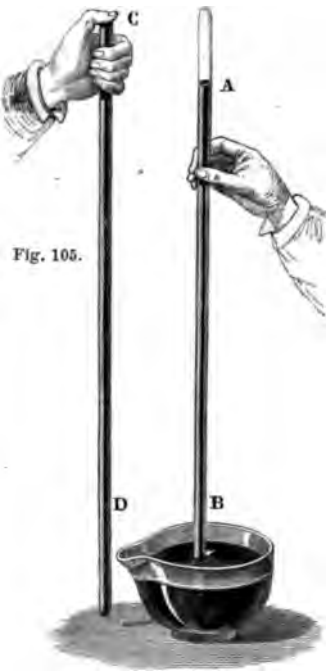


Fig. 105.

Si le poids de l'atmosphère augmente ou diminue, il en est de même de la hauteur AB de la colonne de mercure.

141. **Expériences de Pascal.** — Pascal, voulant constater que la force qui soutient le mercure dans le tube de Torricelli est bien la pression de l'atmosphère et non une propriété du mercure, eut recours aux deux expériences suivantes. 1° Prévoyant que la colonne de mercure devait baisser dans le tube à mesure qu'on s'élève, parce qu'alors la pression diminue, il pria Perrier, habitant l'Auvergne, de répéter sur le Puy-de-Dôme l'expérience de Torricelli. Or la colonne de mercure diminua d'environ 8 centimètres, ce qui démontre que c'est bien le poids de l'atmosphère qui soutient le mercure dans le tube, puisque, quand ce poids diminue, il en est de même de la colonne de mercure. 2° Pascal répéta l'expérience de Torricelli, à Rouen, en 1646, avec un autre liquide que le mercure. Il prit un tube de 15 mètres de long, fermé à un bout; il le remplit de vin rouge et le dressa verticalement dans un réservoir plein du même liquide; alors il observa que le liquide

s'arrêtait, dans le tube, à une hauteur d'environ $10^{m},40$, c'est-à-dire 13,6 fois plus grande que celle du mercure; or, le vin rouge étant 13,6 fois moins dense que ce liquide, le poids de la colonne de vin était égal à celui de la colonne de mercure dans l'expérience de Torricelli (140); donc, dans les deux cas, la pression intérieure était la même et égale à celle de l'atmosphère.

142. **Valeur de la pression atmosphérique en kilogrammes.** — La hauteur à laquelle le mercure demeure en équilibre dans le tube de Torricelli fournit le moyen d'évaluer en kilogrammes la pression de l'atmosphère sur une surface donnée. Pour cela, admettons que la section intérieure du tube soit d'un centimètre carré : la colonne de mercure qui est dans le tube ayant alors la forme d'un cylindre d'un centimètre carré de base et de 76 centimètres de hauteur, son volume est de 76 centimètres cubes. Or, 1 centimètre cube d'eau pesant 1 gramme, 1 centimètre cube de mercure doit peser $13^{gr},6$, puisque ce liquide est 13,6 fois plus dense que l'eau : d'où l'on conclut que le poids de la colonne de mercure, dans le tube, équivaut à $13^{gr},6$ multipliés par 76, c'est-à-dire 1033 grammes, ou, ce qui est la même chose, à 1 kilogramme et 33 grammes; telle est donc la pression sur un centimètre carré. Par suite, sur un décimètre carré, qui contient 100 centimètres carrés, la pression atmosphérique est de 103^{kil}, 300^{gr}, et sur un mètre carré, qui renferme 100 décimètres carrés, elle équivaut à 10 330 kilogrammes.

La surface totale du corps humain, chez un sujet de taille et de grosseur ordinaires, étant d'un mètre carré et demi, la pression moyenne que supporte un homme, à la surface de la terre, est de 15 500 kilogrammes. Il semble qu'une pression aussi considérable devrait nous écraser; mais notre corps y résiste par la réaction des fluides élastiques qu'il renferme. Nos membres n'en éprouvent même aucune gêne dans leurs mouvements, parce que, la pression atmosphérique s'exerçant dans toutes les directions, nous supportons en tous sens des pressions égales et contraires qui se font équilibre et sont plus propres à nous soutenir qu'à nous gêner. En effet, les jours où la pression atmosphérique est plus faible, nous éprouvons un malaise qui nous fait dire que *le temps est lourd;* c'est le contraire qu'il faudrait dire.

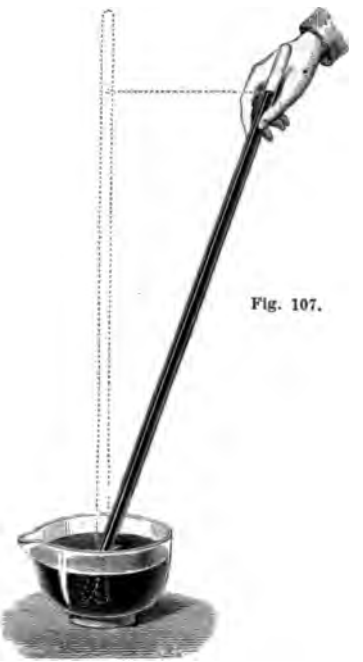
143. **Différentes espèces de baromètres.** — On nomme *baromètres* des instruments propres à mesurer la pression atmosphérique. Dans les baromètres ordinaires, cette pression est mesurée par la hauteur d'une colonne de mercure dans un tube de verre, comme dans l'expérience de Torricelli : tels sont les baromètres que nous allons décrire, et qui se divisent en *baromètre à cu-*

'e, baromètre à siphon et *baromètre à cadran.* Mais on con-
uit aussi des baromètres sans mercure.

44. Baromètre à cuvette. — Le *baromètre à cuvette* se com-
e d'un tube de verre fermé à son sommet, ayant 85 centimètres
iron de longueur, rempli de mercure, et plongeant dans une
ette pleine de ce métal.
est l'appareil déjà décrit
ı le nom de *tube de Tor-*
lli (fig. 105). Le long du
: on adapte une échelle
uée en millimètres, en
ıt soin que le zéro de la
uation corresponde au
au du mercure dans la

Fig. 106.

Fig. 107.



tte. Toutefois ce niveau varie lorsque la pression atmosphé-
e augmente ou diminue, du mercure passant alors de la cuvette
ı le tube ou réciproquement. On atténue cette cause d'erreur
renant une cuvette qui, tout en contenant peu de mercure,
une grande surface. La figure 106 représente, en coupe et en
ection, une cuvette de ce genre. Elle est divisée en deux compar-
nts : l'un, sphérique, est rempli de mercure dans lequel plonge
rémité du tube barométrique; l'autre, cylindrique et à grand
ıètre, permet à la surface libre du mercure de s'étaler plus ou
ıs sur la paroi *n n;* si la pression diminue, du mercure pas-
du tube dans la cuvette, le liquide ne fait alors que s'étaler

davantage, par exemple de *m* en *n*, mais conserve sensiblement le même niveau : il en est encore de même lorsqu'une petite quantité de mercure passe de la cuvette dans le tube. Néanmoins on n'obtient pas ainsi un niveau rigoureusement invariable, et ce n'est qu'avec le baromètre à cuvette de Fortin, décrit ci-après, qu'on arrive à des mesures précises.

Quel que soit le baromètre dont on fasse usage, on nomme *hauteur barométrique* la distance *verticale* du niveau du mercure dans la cuvette au niveau dans le tube. C'est pourquoi le baromètre doit toujours être parfaitement vertical; sinon, le tube étant incliné, la colonne de mercure s'allonge (fig. 107), et le nombre qu'on lit sur l'échelle est trop grand.

Comme on a vu que la pression que le mercure exerce à la base du tube est indépendante de la forme de celui-ci et de son diamètre (84), pourvu qu'il ne soit pas capillaire, la hauteur du baromètre est elle-même indépendante du diamètre du tube et de sa forme droite ou courbe; mais cette hauteur est en raison inverse de la densité du liquide. Avec le mercure, la hauteur moyenne, au niveau des mers, est de $0^m,76$; dans un baromètre à eau, elle serait de $10^m,33$.

145. **Baromètre de Fortin.** — Le *baromètre de Fortin*, ainsi appelé du nom de son inventeur, est un baromètre à cuvette; mais celle-ci diffère de la cuvette du baromètre déjà décrit (144). Le fond en est de peau de chamois, et peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une vis de rappel placée au-dessous, ce qui offre deux avantages : celui de pouvoir obtenir un niveau constant dans la cuvette, et celui de rendre l'instrument plus portatif. En effet, pour le transporter en voyage, il suffit de soulever la peau de chamois jusqu'à ce que, le mercure remontant avec elle, le tube et la cuvette soient complétement remplis; le baromètre peut alors être incliné et même retourné sans qu'on ait à craindre qu'il y entre de l'air ou que le choc du mercure vienne briser le tube.

La figure 109 représente l'ensemble de ce baromètre, dont le tube est renfermé dans un étui de cuivre destiné à le protéger. Cet étui, fendu à sa partie supérieure, y présente deux fenêtres longitudinales, opposées l'une à l'autre, afin de laisser voir le niveau du mercure en B. Sur l'étui est une échelle en millimètres. Un curseur A, qu'on fait marcher à la main, donne, au moyen d'un vernier, la hauteur du baromètre à $\frac{1}{10}$ de millimètre. A la partie inférieure de l'étui est la cuvette *b* contenant le mercure O.

La figure 108 montre, sur une plus grande échelle, les détails de la cuvette. Celle-ci est formée d'un cylindre de verre *b* de 4 centimètres de diamètre environ sur 3 de hauteur. Ce cylindre est

fermé, à sa partie supérieure, par un disque de buis fixé en dessous d'un couvercle de cuivre M. Au centre du disque et du couvercle passe le tube barométrique E, lequel se termine par une pointe effilée qui va plonger dans le mercure de la cuvette. Celle-

Fig. 108.

Fig. 109.

Fig. 110.

i et le tube sont reliés ensemble au moyen d'une peau de chamois e que deux fortes ligatures fixent, l'une en *c*, à un étranglement ratiqué sur le tube; l'autre en *e*, à une tubulure de cuivre fixée u centre du couvercle. Cette fermeture suffit pour empêcher la ortie du mercure lorsqu'on renverse le baromètre; mais 'oppose pas à l'action de la *pression atmosphérique*, lac

transmet très-bien, à travers les pores de la peau de chamois, sur le mercure de la cuvette.

A sa partie inférieure, le cylindre de verre *b* est mastiqué sur un cylindre de buis *zz*, et c'est sur le pourtour de celui-ci, en *tt*, qu'est fortement fixée, à l'aide d'une ligature, la peau de chamois *mn* qui forme le fond de la cuvette. A son centre, cette peau vient s'attacher à un bouton de buis *x*, lequel repose sur l'extrémité d'une vis C. Lorsqu'on tourne celle-ci dans un sens ou dans l'autre, le bouton monte ou descend, et avec lui la peau *mn*. Or le mercure s'élevant ou s'abaissant en même temps, lorsqu'on veut faire une observation, on tourne la vis jusqu'à ce que la surface du liquide atteigne une pointe d'ivoire *a* fixée au couvercle M, et visible à travers le verre. Comme la surface du mercure fait miroir, on y voit l'image renversée de la pointe *a*, et c'est lorsque celle-ci et son image sont tangentes, comme le montre le dessin, qu'on atteint le niveau convenable; car c'est à partir de la pointe *a* qu'est comptée la graduation de l'échelle barométrique. Enfin, un étui de cuivre G enveloppe toute la partie inférieure de la cuvette. Trois boulons à vis *k*, *k*, *k*, le relient au couvercle M.

On a vu (144) combien il importe que le tube barométrique soit, pendant les observations, parfaitement vertical. C'est pour obtenir ce résultat qu'on a appliqué au baromètre de Fortin la suspension suivante, connue sous le nom de ***suspension de Cardan***, du nom de son inventeur.

L'étui métallique qui renferme le tube est fixé par deux vis de pression *a* et *b* (fig. 110) à un manchon de cuivre X. Celui-ci porte deux tourillons *o*, dont un seul est visible dans la figure, lesquels tournent librement dans deux trous pratiqués dans un anneau Y. Enfin, ce dernier porte lui-même, dans une direction perpendiculaire à celles des tourillons *oo*, deux tourillons semblables, *m* et *n*, portés par un support Z. Par cette double suspension, le baromètre peut osciller librement dans deux directions rectangulaires autour des axes *oo* et *mn*. Or comme on a soin que le point de croisement de ces deux axes corresponde au tube barométrique même, le centre de gravité du système mobile, lequel centre doit toujours être plus bas que les axes de suspension, vient se placer de lui-même au-dessous de leur point de croisement, et le baromètre est alors parfaitement vertical.

146. **Baromètre fixe.** — Pour les observations qui se font au laboratoire, et qui demandent une grande précision, M. Regnault, dans ses travaux sur les gaz et les vapeurs, a fait usage d'un baromètre fixe, dont il mesurait la hauteur avec le cathétomètre

(14). Pour cela, la cuvette étant une caisse rectangulaire de fonte, on adapte à sa paroi une pièce portant un écrou *e* (fig. 111). Dans celui-ci passe une vis terminée en pointe à ses deux extrémités, et dont la longueur a été déterminée une fois pour toutes à l'aide du cathétomètre. Cela posé, pour mesurer la hauteur barométrique, on commence par tourner la vis dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que sa pointe affleure avec la surface du mercure dans la cuvette; ce qui a lieu, comme dans le baromètre de Fortin, lorsque la pointe et son image sont en contact. Si l'on mesure alors, avec le cathétomètre, la distance verticale de la pointe *a* de la vis au niveau *b* du mercure dans le tube, et qu'on ajoute à cette distance la longueur de la vis, on a la hauteur barométrique avec une grande précision. Ce baromètre présente en outre l'avantage qu'on peut donner au tube un diamètre intérieur de 2,5 à 3 centimètres, diamètre pour lequel la dépression capillaire n'est plus sensible. Enfin, il ne présente aucune cause d'erreur quant à la position de son échelle, puisque celle-ci est transportée sur le cathétomètre.

Fig. 111.

147. **Baromètre à siphon de Gay-Lussac.** — Le *baromètre à siphon* consiste en un tube de verre recourbé en deux branches inégales; la plus grande, qui est fermée à son sommet, est remplie de mercure de même que dans le baromètre à cuvette; la plus petite, qui est ouverte, tient lieu de cuvette. La différence de niveau dans les deux branches est la hauteur du baromètre.

La figure 112 représente le baromètre à siphon tel qu'il a été modifié par Gay-Lussac. Ce physicien, afin de rendre l'instrument plus facile à transporter en voyage, sans que l'air puisse y pénétrer, a réuni les deux branches par un tube capillaire (fig. 113). Lorsqu'on retourne l'instrument, ce tube, en vertu de la capillarité, reste toujours plein, et l'air ne peut pénétrer dans la grande branche (fig. 114). Cependant, par un choc trop brusque, la colonne de mercure qui est dans le tube capillaire peut se diviser et laisser passer de l'air. Pour obvier à cet inconvénient, Bunten a adopté la modification suivante (fig. 115). Le tube capillaire, au lieu d'être soudé à la grande bran

tube B, d'un fort diamètre, dans lequel pénètre cette branche orme de pointe effilée. Par cette disposition, s'il passe des bulles d'air dans le tube capillaire, elles ne peuvent s'engager dans la pointe effilée du tube, et viennent se loger à la partie la plus élevée du renflement, comme le montre la figure; là elles ne nuisent en rien à l'instrument, puisque le vide existe toujours au sommet.

Dans le baromètre de Gay-Lussac, la courte

Fig. 112.

Fig. 113.

Fig. 114.

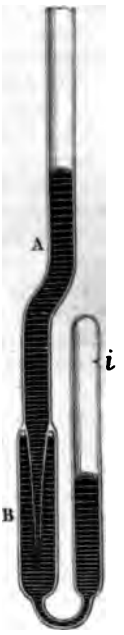


Fig. 115.

iche est fermée à son extrémité supérieure, et ne présente ne petite ouverture latérale *i*, par laquelle s'exerce la pres- atmosphérique.

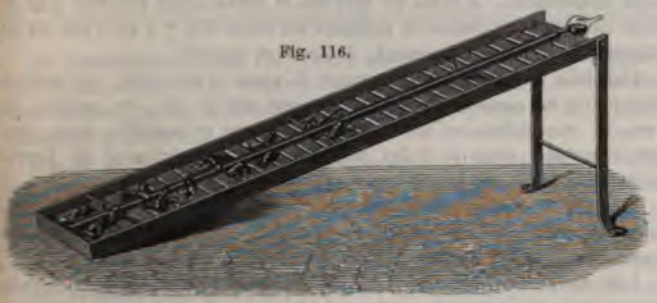
ı hauteur du mercure se prend au moyen de deux échelles, ıt leur zéro commun en O (fig. 112), vers le milieu de la de branche, et graduées en sens contraires, l'une de O vers

E, l'autre de O vers B, sur deux règles de cuivre parallèles au tube barométrique. Deux curseurs à vernier *m* et *n* peuvent glisser sur les échelles, de manière à y indiquer les nombres de millimètres et de dixièmes de millimètre contenus de O à A et de O à B. Faisant la somme des deux nombres ainsi obtenus, on a la hauteur totale AB.

La figure 112 représente le baromètre de Gay-Lussac fixé sur une planchette, ce qui le rend plus propre à la démonstration. Pour voyager, on l'enferme dans un étui de cuivre entièrement semblable à celui du baromètre de Fortin, moins la cuvette.

148. **Conditions auxquelles doit satisfaire un baromètre.** — Dans la construction d'un baromètre, on doit faire choix du mercure, de préférence à tout autre liquide, parce que, étant le plus

Fig. 116.



dense des liquides, c'est celui qui prend la moindre hauteur; mais il mérite encore cette préférence à cause de sa faible volatilité et parce qu'il ne mouille pas le verre. Le mercure doit être parfaitement pur et exempt d'oxyde : autrement il adhère au verre et le ternit. De plus, s'il est impur, sa densité est changée, et la hauteur du baromètre est trop grande ou trop petite.

Dans tout baromètre, l'espace vide qui se trouve au sommet du tube, et qu'on nomme *chambre barométrique*, ou *vide de Torricelli*, doit être complétement purgé d'air et de vapeur d'eau, sinon ces fluides, en vertu de leur force élastique, déprimeraient la colonne de mercure. Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire de faire bouillir le mercure dans le tube même, ce qui se pratique de la manière suivante. On soude à l'extrémité ouverte du tube une ampoule de verre, puis on emplit le tube, jusqu'au col de l'ampoule, de mercure parfaitement pur. Posant le tube ainsi rempli sur une grille de tôle inclinée (fig. 116), on l'entoure de charbons incandescents, de manière à le porter à une te

ture voisine de celle de l'ébullition du mercure. On ajoute alors de nouveaux charbons vers la partie inférieure de la grille, afin de faire naître l'ébullition, et quand elle a été prolongée 4 à 5 minutes, on porte les charbons un peu plus haut; et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on ait fait bouillir le mercure successivement dans toute la longueur du tube. Pendant l'ébullition, les vapeurs mercurielles qui se dégagent occasionnent des soubresauts dans le tube, et tendent à rejeter le mercure au dehors; c'est à recevoir le mercure ainsi projeté qu'est destinée l'ampoule.

Lorsqu'on a fait bouillir le mercure dans le tube, les bulles d'air et l'humidité qui adhéraient au verre ont disparu, et le tube présente l'éclat métallique d'un miroir bien étamé. C'est le signe que le tube est bien purgé. On le reconnaît encore lorsque, en l'inclinant doucement, il rend un son sec et métallique produit par le choc du mercure contre le sommet du tube. S'il y a de l'air ou de l'humidité dans l'instrument, le son est amorti.

Une fois le tube rempli comme il vient d'être dit, on enlève l'ampoule en donnant un trait de lime sur le col, on achève de remplir complétement avec du mercure sec et bouilli, puis, fermant le tube avec le doigt comme dans l'expérience de Torricelli (fig. 105), on le renverse dans sa cuvette.

Le tube à syphon de Gay-Lussac se remplit de la même manière, et c'est après le remplissage qu'on le courbe dans sa partie capillaire, en le chauffant sur des charbons ou à la lampe.

149. **Correction relative à la capillarité.** — Dans les baromètres à cuvette, il y a toujours, dans la hauteur du mercure, une certaine dépression due à la capillarité (114), à moins que le diamètre intérieur du tube ne soit au moins de 2,5 à 3 centimètres. Pour faire la correction que nécessite cette dépression, il ne suffit pas de connaître le diamètre. En effet, on a vu (116) que cette dépression dépend en outre de la *flèche* du ménisque, c'est-à-dire de la hauteur *od* (fig. 117) de la surface convexe du mercure au-dessus de la section horizontale *ab* qui sert de base au ménisque. Or, pour un même tube, la longueur de la flèche n'est pas constante; elle varie selon que le ménisque s'est formé pendant un mouvement ascendant ou descendant. Pour déterminer cette longueur, on fait affleurer le bord supérieur du curseur avec la base du ménisque, puis on le remonte jusqu'à ce qu'il affleure avec le sommet. En lisant sur l'échelle le déplacement du curseur, on a la hauteur de la flèche. Celle-ci connue, ainsi que le diamètre intérieur du tube, on trouve la dépression

Fig. 117.

dans la table suivante, calculée par M. Delcros, table dont nous ne donnons qu'une partie.

DIAMÈTRE intérieur en millimètres.	HAUTEUR DE LA FLÈCHE DU MÉNISQUE											
	mill. 0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6
4	0,60	0,89	1,16	1,41	1,65	1,86	2,05	2,21	2,35	»	»	»
6	0,24	0,36	0,48	0,59	0,70	0,80	0,99	0,99	1,07	1,21	1,32	»
8	0,12	0,18	0,24	0,30	0,35	0,40	0,46	0,50	0,55	0,64	0,71	0,77
10	0,07	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,40	0,44
12	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,21	0,23	0,25
14	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15

La première colonne verticale à gauche contient les diamètres intérieurs des tubes; la première ligne horizontale, les hauteurs des flèches; et les autres colonnes, les dépressions. Pour tous ces nombres l'unité est le millimètre.

On se sert de cette table comme de la table de multiplication ordinaire. Par exemple, si le diamètre intérieur du tube barométrique est 10 millimètres, et la flèche $0^{mm},6$, on trouve, au point de croisement des rangées horizontales et verticales commençant par 10 et par 0,6, le nombre $0^{mm},19$ pour la dépression cherchée.

Le diamètre intérieur des tubes se détermine en les pesant successivement vides et pleins de mercure. La différence des poids donne alors le poids du cylindre de mercure contenu dans les tubes. La hauteur de ce cylindre étant facile à mesurer avec précision, le diamètre se calcule ensuite par la formule $P = VD$.

Dans le baromètre de Gay-Lussac, pour éviter la correction relative à la capillarité, on a soin que les deux branches A et B (fig. 112) soient de même diamètre; car alors les dépressions tendent à se compenser. Mais on n'obtient ainsi qu'une correction approchée. En effet, d'après ce qu'on a vu ci-dessus, les flèches des deux ménisques ne sont jamais rigoureusement égales; car lorsque le mouvement du mercure est ascendant dans l'une des branches, il est descendant dans l'autre.

150. Correction de température. — Dans toutes les observations barométriques il faut avoir égard à la température. En effet, le mercure se dilatant ou se contractant par les variations de température, sa densité change, et, par suite, sa hauteur, puisque cette hauteur est en raison inverse de la densité du [1]
fermé dans le tube; en sorte que, pour des pressi

riques différentes, on pourrait avoir des hauteurs égales dans le baromètre. Il importe donc, à chaque observation, de ramener toujours la hauteur à ce qu'elle serait à une température déterminée et invariable. Celle-ci étant arbitraire, on a choisi la température de la glace fondante. On verra, dans l'étude de la chaleur (316), comment se fait cette correction par le calcul. C'est pour connaître la température du mercure dans le baromètre qu'on place un thermomètre près du tube (fig. 109, 111 et 112).

On peut aussi ramener à zéro la hauteur du baromètre, au moyen de tables de correction construites pour cet usage, et données dans les Annuaires du Bureau des Longitudes.

151. **Variations de la hauteur barométrique.** — Lorsqu'on observe le baromètre pendant plusieurs jours, on remarque que sa hauteur varie, en chaque lieu, non-seulement d'un jour à l'autre, mais encore dans une même journée.

L'amplitude des variations, c'est-à-dire la différence moyenne entre la plus grande et la plus petite hauteur, n'est pas partout la même. Elle croît de l'équateur vers les pôles. Les plus grandes variations, sauf les cas extraordinaires, sont de 6 millimètres sous l'équateur, de 30 sous le tropique du Cancer, de 40 en France, à la latitude moyenne, et de 60, à 25 degrés du pôle. Enfin, les plus fortes variations ont lieu en hiver.

On nomme *hauteur moyenne diurne* le nombre qu'on obtient en faisant la somme de vingt-quatre observations successives du baromètre, prises d'heure en heure, et en divisant cette somme par 24. Ramond a constaté qu'à notre latitude, la hauteur du baromètre, à midi, est sensiblement la moyenne du jour.

La *hauteur moyenne mensuelle* s'obtient en additionnant les hauteurs moyennes diurnes pendant un mois, et en divisant par 30.

Enfin, la *hauteur moyenne de l'année* se détermine en ajoutant les hauteurs moyennes de chaque jour pendant un an, et en divisant la somme par 365.

Sous l'équateur, la moyenne annuelle, au niveau des mers, est $0^m,758$. Elle croît à partir de l'équateur, et atteint, entre les latitudes de 30 à 40 degrés, un maximum de $0^m,763$. Elle décroît dans les latitudes plus élevées, et, à Paris, n'est que de $0^m,7568$.

La moyenne générale, au niveau des mers, est de $0^m,761$.

La moyenne mensuelle est plus forte en hiver qu'en été; ce qui est une conséquence du refroidissement de l'atmosphère.

On distingue, dans le baromètre, deux sortes de variations : 1° les *variations accidentelles*, qui n'offrent aucune régularité dans leur marche, et qui dépendent des saisons, de la direction des vents et de la position géographique : ce sont celles qu'on ob-

s zones tempérées, il y a aussi des variations diurnes ; sont plus difficiles à constater qu'à l'équateur, parce confondent avec les variations accidentelles.

ires des maxima et des minima des variations diurnes être les mêmes dans tous les pays, quelle que soit la seulement elles varient un peu avec les saisons.

ses des variations barométriques. — La marche du ba-st, en général, en sens contraire de celle du thermomè-b-dire que, la température s'élevant, le baromètre baisse, *vâ*, ce qui indique que les variations barométriques, en r résultent des dilatations ou des contractions de l'air, nséquent, de ses changements de densité. Si la tempé-l'air était constante et uniforme dans toute l'étendue de ère, il ne se produirait, dans le sein de celle-ci, aucun et la pression atmosphérique, à hauteur égale, serait même. Mais lorsqu'une région de l'atmosphère s'échauffe les régions voisines, l'air dilaté s'élève en vertu de sa spécifique, et s'écoule par les hautes régions de l'at-; d'où il résulte que la pression décroît et que le baro-sse, tandis que la pression augmente et que le baromètre où s'est portée la masse d'air déplacée. Aussi arrive-t-il, l, qu'une baisse extraordinaire, sur un point du globe, nsée par une hausse semblable sur un autre point.

is les changements de température n'influent pas seuls auteur du baromètre. En météorologie, on verra qu'au

Quant aux variations diurnes, elles résultent des dilatations qui se produisent périodiquement dans l'atmosphère par l'effet de l'action calorifique du soleil pendant la rotation de la terre.

153. **Relation entre les variations barométriques et l'état du ciel.**— On remarque, dans nos climats, que le baromètre se tient communément, par le beau temps, au-dessus de 0,758; au-dessous de ce point, dans les temps de pluie, de neige, de vent ou d'orage; et enfin que, sur un certain nombre de jours où le baromètre marque $0^m,758$, il y a, en moyenne, autant de jours de beau temps que de jours de pluie. C'est d'après cette coïncidence entre la hauteur du baromètre et l'état du ciel, qu'on a marqué les indications suivantes sur le baromètre, en comptant de 9 en 9 millimètres au-dessus et au-dessous de $0^m,758$.

Hauteur.		État de l'atmosphère.
785	millimètres.	Très-sec.
776	—	Beau fixe.
767	—	Beau temps.
758	—	Variable.
749	—	Pluie ou vent.
740	—	Grande pluie.
731	—	Tempête.

En consultant le baromètre comme instrument propre à annoncer les changements de *temps*, il ne faut pas perdre de vue qu'il n'est réellement destiné qu'à mesurer le poids de l'air, et qu'il ne monte ou ne descend qu'autant que ce poids augmente ou diminue. Or, de ce que les changements de temps coïncident le plus souvent avec les variations de pression, cela ne veut pas dire qu'ils y soient invariablement liés. Cette coïncidence tient à des conditions météorologiques particulières à notre climat, et elle n'est pas sans offrir d'exceptions. Si l'abaissement du baromètre précède ordinairement la pluie dans nos contrées, cela tient à la position de l'Europe. En effet, les vents du sud-ouest, qui sont les plus chauds, et par conséquent les moins lourds, font baisser le baromètre; mais en même temps, comme ils se sont chargés de vapeurs d'eau en traversant l'Océan, ces vapeurs, rencontrant un air plus froid, se condensent et se résolvent en pluie. Au contraire, les vents du nord et du nord-est étant froids et plus denses, font monter le baromètre; mais comme ils rencontrent une atmosphère plus chaude, les vapeurs qu'ils contiennent ne peuvent se condenser et donner de la pluie.

Lorsque le baromètre monte ou descend lentement, c'est-à-dire pendant deux ou trois jours, vers le beau temps ou vers la pluie, il résulte d'un grand nombre d'observations que les indications fournies par cet instrument sont alors extrêmement probables.

aux variations brusques, dans l'un ou l'autre sens, elles nt la pluie ou le vent.

on a égard aux remarques précédentes, en même temps direction des vents et à la température de l'air, on peut u baromètre d'utiles indications, particulièrement pour ulture et la navigation.

is quelques années le télégraphe électrique est venu prêecours précieux aux observations barométriques. Les rennents qu'il fournit mettant les météorologistes à même asser simultanément la température, la pression atmosphét la direction des vents, e étendue considérable de ls peuvent suivre sur le es grands mouvements de phère, et prévoir, pluheures et même plusieurs l'avance, les bourrasques nacent telle ou telle con-

Fig. 118. Fig. 119.

les *pronostics du temps* ge des navigateurs, qu'on rd publiés en Angleterre, n publie aujourd'hui en ; mais ces pronostics sont le échéance. Quant à ceux nnent quelques météoro- s pour un avenir éloigné, utorise à y avoir confiance.

Baromètre à cadran. — *omètre à cadran*, dû à , est un baromètre à sicstiné à indiquer le beau auvais temps. Il est ainsi parce qu'il est muni d'un sur lequel se meut une aiguille (fig. 118), qui est n mouvement par le merême de l'instrument, au du mécanisme représenté figure 119. A l'axe de le est fixée une poulie O, sur laquelle s'enroule un fil qui l'une de ses extrémités un poids P, et à l'autre un flotteur plus pesant que ce poids, et soutenu par le mer

petite branche du tube barométrique. Si la pression atmosphérique vient à augmenter, le niveau baisse dans la petite branche, le flotteur descend, et entraîne la poulie et l'aiguille de gauche à droite. Le mouvement contraire a lieu quand la pression diminue, parce que le mercure s'élève dans la petite branche et remonte en même temps le flotteur. Il résulte de là que l'aiguille s'arrête aux mots *variable, pluie, beau temps, beau fixe,* etc., lorsque le baromètre prend les hauteurs correspondantes, pourvu, toutefois, que l'instrument soit bien réglé; or ceux qu'on trouve dans le commerce satisfont rarement à cette condition.

155. **Mesure des hauteurs par le baromètre.** — La pression de l'atmosphère décroissant à mesure qu'on atteint des lieux plus élevés, il en résulte que le baromètre baisse d'autant plus, qu'il est porté à une plus grande hauteur, ce qui permet d'utiliser cet instrument pour mesurer la hauteur des montagnes.

Si la densité de l'air restait la même à toutes les hauteurs, on déduirait, par un calcul simple, la hauteur dont on s'est élevé de la quantité dont le baromètre se serait abaissé. En effet, la densité du mercure étant 10 466 fois plus grande que celle de l'air, si le baromètre s'abaissait de 1 millimètre, cela indiquerait qu'on s'est élevé de 10 466 fois $0^m,001$, c'est-à-dire de $10^m,466$. Si la dépression dans le baromètre était de 2, 3... millimètres, on en conclurait de même que l'ascension aurait été de deux fois, trois fois... $10^m,466$. Mais comme la densité de l'air décroît lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, le calcul ci-dessus ne peut s'appliquer qu'à de très-petites hauteurs.

Pour mesurer la hauteur des montagnes à l'aide du baromètre, Laplace a donné la formule

$$D = 18393\,(1 + 0{,}002837 \cos 2\varphi)\left[1 + \frac{2\,(T+t)}{1000}\right] \log \frac{H}{h},$$

dans laquelle D désignant la distance verticale entre les deux lieux dont on cherche la différence de niveau, H représente la hauteur du baromètre à la station inférieure, et h la hauteur à la station supérieure; T et t sont les températures de l'air correspondantes à chaque observation; φ est la latitude.

Pour la latitude de 45°, $\cos 2\varphi = 0$, et la formule devient

$$D = 18393\left[1 + \frac{2\,(T+t)}{1000}\right] \log \frac{H}{h}.$$

Pour les hauteurs moindres que 1000 mètres, Babinet a donné la formule

$$D = 16000^m\left(\frac{H-h}{H+h}\right)\left[1 + \frac{2\,(T+t)}{1000}\right],$$

qui dispense de l'usage des logarithmes.

Si la hauteur à mesurer n'est pas très-grande, on peut opérer seul; mais si elle est un peu considérable et exige un temps d'as-

cension un peu long, pendant lequel la pression atmosphérique peut varier, il faut être deux, et avoir deux baromètres bien d'accord. L'un des observateurs reste au pied de la montagne, l'autre se transporte au sommet; puis, à une heure donnée, ils observent simultanément la hauteur du baromètre et la température.

CHAPITRE II

MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ

156. **Loi de Mariotte.**— Mariotte, physicien français, mort en 1684, posa, le premier, la loi suivante sur la compressibilité des gaz : *La température restant la même, le volume d'une masse donnée de gaz est en raison inverse de la pression.*

Cette loi se vérifie, pour l'air, au moyen de l'appareil suivant, connu sous le nom de *tube de Mariotte*. Sur une planchette de bois, maintenue verticalement, est fixé un tube de verre recourbé, dont les deux branches sont inégales (fig. 120). Le long de la petite branche, qui est fermée, est une échelle indiquant des capacités égales, tandis que l'échelle placée le long de la grande branche donne les hauteurs en centimètres. Les zéros des deux échelles sont sur une même ligne horizontale.

Pour faire l'expérience, on verse d'abord du mercure dans l'appareil par le sommet de la grande branche, de manière que le niveau du liquide corresponde au zéro dans les deux branches (fig. 120), ce qu'on obtient après quelques tâtonnements. L'air renfermé dans la courte branche est alors soumis à la pression atmosphérique qui s'exerce, dans la grande, sur la surface du mercure, sinon le niveau ne serait pas le même. On verse enfin du mercure dans le grand tube jusqu'à ce que la pression qui en résulte réduise de moitié le volume d'air renfermé dans la petite branche, c'est-à-dire jusqu'à ce que le volume, qui était 10 d'abord, ne soit plus que 5, ainsi que le montre la figure 121. Mesurant alors la différence de niveau CA du mercure dans les deux tubes, on trouve qu'elle est précisément égale à la hauteur du baromètre au moment où l'on expérimente. La pression de la colonne CA équivaut donc à une atmosphère. En y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce en A, au sommet de la colonne, on voit qu'au moment où le volume d'air s'est réduit de moitié, la pression est double de ce qu'elle était d'abord : ce qui démontre la loi.

Si la grande branche est assez longue pour qu'on puisse y ver-

ser du mercure jusqu'à ce que le volume d'air de la courte branche se réduise au tiers de ce qu'il était d'abord, on trouve que la différence de niveau, dans les deux tubes, est égale à deux fois

Fig. 120 (h=1m).

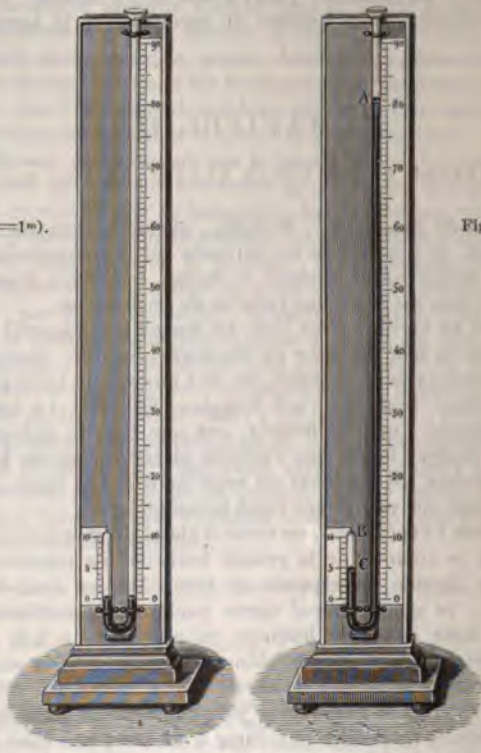


Fig. 121.

la hauteur du baromètre; c'est-à-dire qu'elle équivaut à deux pressions atmosphériques, qui, s'ajoutant à celle qui s'exerce directement sur la surface du mercure dans le grand tube, donnent une pression de 3 atmosphères. C'est donc sous une pression triple que le volume d'air est devenu trois fois moindre. La loi de Mariotte a été vérifiée ainsi, pour l'air, jusqu'à 27 atmosphères, par Dulong et Arago, au moyen d'un appareil décrit ci-après (fig. 124).

Cette loi se vérifie aussi pour des pressions moindres qu'une atmosphère. A cet effet, on remplit de mercure, jusqu'aux deux

ers environ, un tube de verre gradué, le reste contenant de l'air; uis on le retourne et on le plonge dans une éprouvette profonde, leine de mercure (fig. 122). Enfonçant ensuite le tube jusqu'à ce ue le niveau du mercure soit le ième à l'intérieur et à l'extérieur, n lit sur le tube quel est le volume d'air qu'il contient. Cela posé, n soulève le tube, comme le représente la figure 123, jusqu'à ce ue, par la diminution de pression, le volume d'air AC soit double e AB (fig. 122). Or on trouve lors que le mercure s'élève dans le ube, et que la hauteur CD qu'il tteint est la moitié de celle du nercure dans le baromètre au moment de l'expérience. L'air, dont le olume a doublé, n'est donc plus u'à une demi-pression atmosphérique; car c'est la force élastique e cet air qui, jointe au poids de a colonne CD, fait équilibre à la ression atmosphérique extérieure. e volume est donc bien encore en aison inverse de la pression.

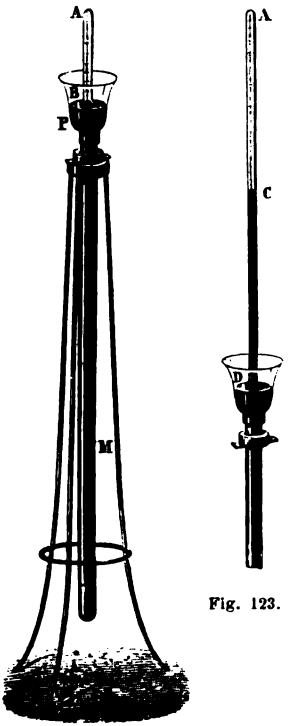


Fig. 123.

Fig. 122.

157. **Expérience de Dulong et Arago sur la loi de Mariotte.** — On avait admis, jusqu'à ces dernières années, la loi de Mariotte d'une manière absolue pour tous les gaz et à toutes les pressions. Despretz fit voir, le premier, que l'acide carbonique, l'hydrogène sulfuré, l'ammoniaque et le cyanogène sont plus compressibles que l'air, et que l'hydrogène, se comportant d'abord comme l'air jusqu'à une pression de 15 atmosphères, est ensuite moins compressible. Les expériences de Despretz ayant fait voir que tous les gaz ne sont pas également compressibles, on en conclut que la loi de Mariotte n'était pas générale.

Cette loi venait d'être trouvée en défaut, quand Dulong et Arago entreprirent sur la force élastique de la vapeur d'eau des recherches dans lesquelles ils devaient faire usage d'un manomètre à air comprimé (162) pour mesurer la tension. Voulant

s'assurer de l'exactitude de leur manomètre, ils le graduèrent, non pas d'après la loi de Mariotte, mais en soumettant directement l'air renfermé dans le manomètre à des pressions de plus en plus grandes. Pour cela, ils disposèrent leur appareil comme le montre la figure 124. Un réservoir P, de fonte, porte latéralement deux tubulures Q, R. Dans la première est scellé le tube manométrique A, de près de deux mètres de long; ce tube est rempli d'air sec, et entouré d'un manchon de verre dans lequel tombe un courant d'eau froide pour maintenir la température constante, malgré l'échauffement que tend à prendre l'air dans le tube en se comprimant. Sur la seconde tubulure est fixée une série de treize tubes de cristal B, B', B''..., chacun de deux mètres de longueur, et reliés entre eux au moyen de garnitures de fer.

Ces tubes étaient appliqués le long de forts madriers de sapin, et pour qu'ils n'exerçassent pas de pression les uns sur les autres, à chaque garniture, comme on le voit en C, étaient attachés deux cordeaux s'enroulant sur des poulies, lesquelles étaient portées par les madriers mêmes qui soutenaient tous les tubes. A ces cordeaux étaient suspendus de petits seaux, *p*, *p*, chargés de grenaille de plomb, et faisant équilibre, deux par deux, à un tube et à sa garniture. Enfin, sur le réservoir P était adaptée une pompe aspirante et foulante, qui aspirait de l'eau d'un vase S et la refoulait dans le réservoir P. Or, celui-ci ayant été d'avance rempli de mercure jusqu'aux deux tiers environ, lorsqu'on faisait marcher la pompe, la pression transmise par l'eau au mercure refoulait ce dernier dans les tubulures Q et R; en sorte qu'il s'élevait en même temps dans les tubes B, B', B''..., et dans le manomètre A, absolument comme dans l'expérience du tube de Mariotte, dont les tubes B, B', B''..., figuraient la grande branche, et le tube manométrique la petite. A mesure que le volume d'air se réduisait ainsi dans le tube A, la hauteur du mercure dans les tubes B, B', B''..., faisait connaître la pression correspondante. Cette hauteur se mesurait au moyen de règles divisées en millimètres et munies de verniers, qu'on portait le long des tubes, en les appliquant sur des points de repère tracés sur les garnitures de jonction.

Dulong et Arago, ayant expérimenté jusqu'à 27 atmosphères, observèrent que le volume de l'air diminuait toujours un peu plus dans le tube A que ne l'indiquait la loi de Mariotte; mais les différences étant très-petites, ils les attribuèrent à des erreurs d'observation, et admirent que cette loi était rigoureuse pour l'air, du moins jusqu'à 27 atmosphères, limite de leur expérience.

Enfin, M. Regnault, en 1847, publia des expériences sur la compressibilité des gaz faites avec un appareil qui avait beaucoup de

ort avec celui de Dulong et Arago, mais dans lequel on avait
compte de toutes les causes d'erreur et fait les observations
une précision extrême. Or, ayant expérimenté sur l'air, l'a-

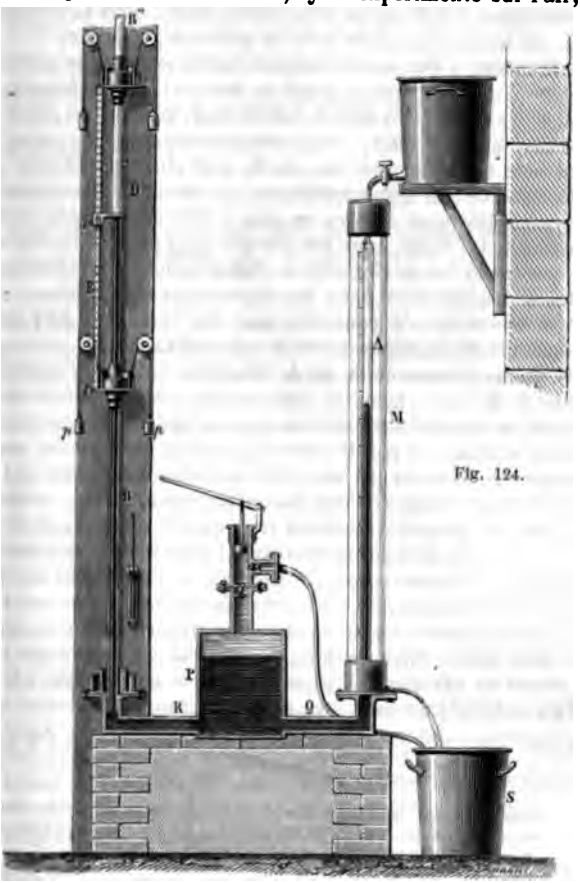


Fig. 124.

l'acide carbonique et l'hydrogène, M. Regnault constata d'a-
que l'air ne suit pas rigoureusement la loi de Mariotte, mais
mprime plus qu'elle ne l'indique, et que, de plus, sa com-
ibilité augmente avec la pression ; c'est-à-dire que les résul-
btenus par l'observation et ceux déduits de la loi de
ent d'autant plus, que la *pression est plus* forte.

M. Regnault a trouvé que l'azote se comporte comme l'air; seulement il est moins compressible. L'acide carbonique s'éloigne beaucoup de la loi de Mariotte, lorsque les pressions sont un peu considérables. L'hydrogène s'en écarte aussi; mais sa compressibilité, au lieu d'augmenter avec la pression, diminue.

M. Regnault a encore observé sur l'acide carbonique que ce gaz s'éloigne d'autant moins de la loi de Mariotte, que la température est plus élevée, et l'on admet, en général, qu'il en est ainsi pour les autres gaz. En effet, l'expérience montre que les gaz s'écartent d'autant plus de cette loi, qu'ils sont plus près de leur point de liquéfaction, et qu'au contraire, en s'éloignant de ce point, la compressibilité tend de plus en plus à devenir proportionnelle à la pression. Du reste, pour les gaz qui n'ont pu être liquéfiés, les écarts entre la loi de Mariotte et l'observation sont extrêmement faibles et négligeables dans les expériences de physique et de chimie, lorsqu'on n'y considère que des variations de pression peu considérables, comme c'est le cas ordinaire.

158. **Conséquences de la loi de Mariotte.**— Dans l'expérience du tube de Mariotte, la masse d'air renfermée dans le tube restant la même, sa densité devient nécessairement d'autant plus grande, que son volume est réduit davantage; d'où l'on déduit, comme conséquence de la loi de Mariotte, le principe suivant, qui n'en est qu'un autre énoncé : *Pour une même température, la densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte.* Par exemple, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, la densité de l'air étant 773 fois moindre que celle de l'eau (133), sous une pression de 773 atmosphères, l'air aurait la même densité que l'eau, si, à une telle pression, il était encore gazeux; ce qu'on ignore.

On peut encore énoncer la loi de Mariotte, en disant que, pour une masse de gaz donnée, prise à la même température, *le produit du volume par la pression est constant.*

En effet, soient V le volume à la pression P, et V′ le volume à la pression P′, d'après la loi de Mariotte on a $\frac{V}{V'}=\frac{P'}{P}$, d'où $VP=V'P'$.

159. **Problèmes sur la loi de Mariotte.** — I. Un vase à parois compressibles contient $4^{lit},3$ d'air, la pression étant $0^{m},74$, quel serait le volume d'air à la pression $0^{m},76$, la température restant la même?

Le volume d'air étant $4^{lit},3$ à la pression $0^{m},74$, il est, d'après la loi de Mariotte, 74 fois plus grand à la pression $0^{m},01$, ou $4^{lit},3\times74$, et, d'après la même loi, 76 fois plus petit à la pression $0^{m},76$, c'est-à-dire $\frac{4,3\times74}{76}=4^{lit},186$.

II. On a 20 litres de gaz sous la pression d'une atmosphère; à quelle pression, en atmosphères, doit être soumis ce volume pour se réduire à huit litres?

Pour réduire le volume de 20 litres à un seul, il faudrait, d'après la loi de Mariotte, une pression 20 fois plus grande, ou 20 atmosphères; pour l'amener

ensuite d'un seul litre à 8, il faut une pression 8 fois plus petite, c'est-à-dire, $\frac{20}{8}=2$ atmosphères $\frac{1}{2}$.

III. Un litre d'air pèse $1^{gr},293$ à zéro et sous la pression 76^{c} de mercure; quel serait le poids, à température égale, de V litres d'air à la pression H?

Un litre d'air, pesant $1^{gr},293$ à la pression 76^{c}, pèse $\frac{1^{gr},293}{76}$ à la pression 1^{c}, et $\frac{1^{gr},293 \times H}{76}$ à la pression H; donc le poids P de V litres, à zéro et à la pression H, est $P=\frac{1^{gr},293 \times H \times V}{76}$.

IV. La densité d'un gaz est d à la pression barométrique H; quelle sera sa densité d' à la pression $0^{m},76$?

Les densités des gaz, comme leurs poids, étant directement proportionnelles aux pressions, on a $\frac{d'}{d}=\frac{0^{m},76}{H}$, d'où $d'=\frac{d \times 0,76}{H}$.

160. **Manomètres.** — On donne le nom de *manomètres* à des instruments destinés à mesurer la tension des gaz et des vapeurs. On distingue le *manomètre à air libre*, le *manomètre à air comprimé* et le *manomètre métallique*.

Dans tous, l'unité de mesure est la pression atmosphérique, lorsque la hauteur du baromètre est $0^{m},76$. On a vu (142) que cette pression, sur un centimètre carré, équivaut au poids de $1^{kil},033^{gr}$; par conséquent, si l'on dit d'un gaz qu'il a une tension de 2, de 3 atmosphères, cela signifie que sa tension ferait équilibre au poids d'une colonne de mercure de deux fois, trois fois 76 centimètres de hauteur; ou, en d'autres termes, qu'il exerce, sur chaque centimètre carré des parois qui le contiennent, une pression égale à deux fois ou trois fois $1^{kil},033^{gr}$.

161. **Manomètre à air libre.** — Le *manomètre à air libre* consiste en un tube de cristal BD (fig. 125) recourbé et soudé à la partie inférieure d'un réservoir A, de même matière. A la partie supérieure de celui-ci est soudé un tube C, qui se rend au récipient fermé qui contient le gaz ou la vapeur dont on veut mesurer la tension. Le réservoir A est rempli de mercure, et le tout est fixé sur une longue planchette de bois qu'on établit verticalement.

Pour graduer le manomètre, on laisse l'orifice C communiquer avec l'atmosphère, et, au niveau où le mercure s'arrête alors dans le tube de cristal, on marque le chiffre 1, c'est-à-dire une atmosphère; puis, à partir de ce point, de 76 en 76 centimètres, on marque les chiffres 2, 3, 4, 5, 6, qui indiquent le même nombre d'atmosphères, puisqu'une colonne de mercure de 76 centimètres représente une pression atmosphérique. On partage enfin les intervalles de 1 à 2, de 2 à 3,.... en 10 parties égal[illegible]nt

les dixièmes d'atmosphère. Les nombres à gauche du tube donnent les pressions en centimètres du mercure.

Le tube C étant ensuite mis en communication, par exemple, avec une chaudière à vapeur, le mercure s'élève dans le tube BD à une hauteur qui mesure la tension de la vapeur. Dans le dessin, le manomètre marque 2 atmosphères, qui sont représentées par 1 fois la hauteur de 76 centimètres, plus la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet de la colonne par l'orifice D.

Le manomètre à air libre n'est en usage que pour des pressions qui ne dépassent pas 5 à 6 atmosphères. Au delà, il faudrait donner au tube BD une longueur qui le rendrait embarrassant; on fait alors usage du manomètre suivant.

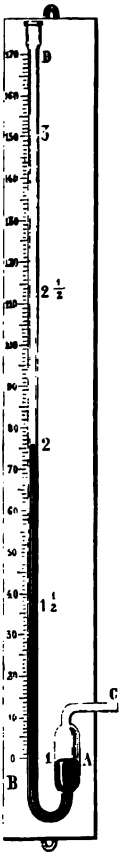


Fig. 125.

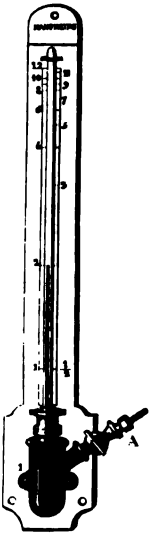


Fig. 126.

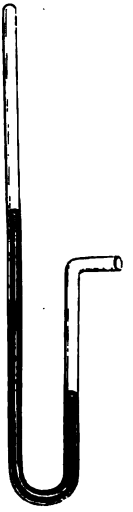


Fig. 127.

162. **Manomètre à air comprimé.** — Avec le manomètre à air libre, la tension se mesure par la hauteur de la colonne de mercure à laquelle elle fait équilibre. Dans le *manomètre à air comprimé,* elle se mesure par la réduction de volume qu'elle imprime à une masse donnée d'air. Pour cela, le tube manométrique, qui

ı ici que 60 à 80 centimètres de longueur, est fermé à sa partie périeure et rempli d'air. A la partie inférieure, il est encore en mmunication avec un réservoir plein de mercure; mais, à cause s grandes pressions que l'instrument peut avoir à mesurer, ce servoir est de fer. A sa partie supérieure est un orifice dans le-ıel est solidement mastiqué le tube manométrique, lequel plonge squ'au fond du réservoir (fig. 126). Une tubulure latérale A met manomètre en communication avec le récipient dans lequel est gaz dont on doit déterminer la tension.

On gradue expérimentalement ce manomètre en comparant sa arche à celle d'un manomètre à air libre suffisamment prolongé. our cela, ayant réglé la quantité d'air dans le tube, de manière ı'à la pression d'une atmosphère, le niveau du mercure y soit même que dans le réservoir, on fait communiquer l'instrument, ı même temps que le manomètre à air libre auquel on veut le mparer, avec un récipient dans lequel on comprime de l'air au oyen d'une pompe foulante. Le mercure s'élevant alors dans les ux instruments, à mesure que le manomètre à air libre marque 2, 3... atmosphères, on inscrit les mêmes nombres, au niveau ı mercure, sur une échelle le long du tube manométrique. L'in-rument se trouve ainsi gradué avec exactitude, que le tube en ıit ou non de même diamètre dans toute sa longueur.

On peut aussi graduer le manomètre à air comprimé par le calcul suivant, ıl suppose que le tube est partout de même diamètre. Soit d'abord le cas où diamètre intérieur de la cuvette est assez grand pour qu'on puisse admettre ıe le niveau y reste sensiblement constant, lorsque le mercure s'élève dans tube. Le manomètre étant mis en communication avec un récipient qui con-ent un gaz comprimé, soient F la tension en centimètres dans ce vase, h la ıuteur du tube manométrique à partir du niveau du mercure dans la cuvette, x la hauteur à laquelle s'élève le mercure par l'effet de la pression F.

La pression extérieure étant d'abord d'une atmosphère, ou 76 centimètres, volume d'air dans le tube manométrique peut être représenté par h; mais la ession extérieure devenant F, le volume d'air se réduit à $h-x$; il est donc ors plus comprimé, et acquiert une tension f qu'on calcule d'après la loi de ariotte, en posant $\frac{f}{76}=\frac{h}{h-x}$; d'où $f=\frac{76h}{h-x}$. Or F faisant équilibre à la ıonne de mercure x et à l'élasticité f de l'air comprimé, on a $F=\frac{76h}{h-x}+x$ [1]; 'où l'on tire les deux valeurs

$$x'=\frac{(F+h)+\sqrt{(F+h)^2-4h(F-76)}}{2}, \quad [2]$$

$$x''=\frac{(F+h)-\sqrt{(F+h)^2-4h(F-76)}}{2}. \quad [3]$$

La seconde est la seule qui satisfasse à la question; car en y faisant $F=76$, ıl 'ient $x''=0$, ce qui est exact, tandis qu'en *donnant* la même valeur

l'équation [2], on trouve $x' = h + 76$, valeur impossible, puisque x est nécessairement $< h$. En posant successivement $F = 2.76$, $F = 3.76$...., dans l'équation [3], on obtient les hauteurs auxquelles on doit inscrire, sur l'échelle, les nombres 2, 3, 4,... atmosphères, à partir du niveau dans la cuvette.

Si actuellement on veut tenir compte de la dépression du mercure dans la cuvette, soient x' cette dépression, R le rayon intérieur de la cuvette, r celui du tube manométrique, et x l'ascension du mercure dans ce dernier, l'ascension et la dépression du mercure étant en raison inverse des sections du tube et de la cuvette, ou, ce qui est la même chose, en raison inverse des carrés des rayons de ces mêmes sections, on a $\frac{x'}{x} = \frac{r^2}{R^2}$, d'où $x' = \frac{r^2 x}{R^2}$.

Cela posé, la différence de niveau dans le tube et dans la cuvette étant actuellement $x + x'$, la tension F fait équilibre à une colonne de mercure $x + x'$, plus à la force élastique de l'air comprimé dans le tube, laquelle est encore $\frac{76h}{h-x}$. On a donc $F = x + x' + \frac{76h}{h-x}$. En remplaçant x' par sa valeur et réduisant, $F = \frac{(R^2 + r^2)x}{R^2} + \frac{76h}{h-x}$. [4]

Dans le cas où le manomètre consisterait simplement en un tube recourbé, fermé à son extrémité supérieure et contenant du mercure (fig. 127), on aurait $R = r$, et alors la formule [4] devient $F = 2x + \frac{76h}{h-x}$. [5]

163. **Manomètre barométrique de M. Regnault.** — Pour mesurer les faibles tensions, M. Regnault a adopté un manomètre qui est une modification de son baromètre fixe déjà décrit (146). A côté du tube barométrique est un second tube *a* d'égal diamètre, plongeant dans la même cuvette (fig. 128). Ce tube, ouvert à ses deux bouts, est en communication à sa partie supérieure avec une tubulure à trois branches *m*, laquelle communique d'une part avec une machine pneumatique, de l'autre avec l'appareil où l'on veut faire le vide. Plus la raréfaction est poussée loin dans celui-ci, plus le mercure s'élève dans le tube *a*; en sorte que c'est la différence de niveau dans les tubes *b* et *a* qui fait connaître la tension. Il n'y a donc qu'à mesurer la hauteur *ab* à l'aide du cathétomètre, pour avoir avec précision la force élastique dans l'appareil où l'on fait le vide. Cet appareil se désigne aussi sous le nom de *baromètre différentiel*.

164. **Manomètre de Bourdon.** — Cet instrument, qui est entièrement métallique et sans mercure, est construit d'après le principe suivant, fondé sur la déformation qu'éprouvent les tubes par la pression : lorsqu'un tube à parois flexibles et légèrement aplaties sur elles-mêmes est enroulé en spirale, dans le sens de son plus petit diamètre, *toute pression intérieure sur les parois a pour effet de dérouler le tube, et, au contraire, toute pression extérieure a pour effet de l'enrouler davantage.*

D'après ce principe, le manomètre de Bourdon se compose d'un tube de laiton, long de $0^m,70$, recourbé en hélice suivant un tour et demi, et à parois minces et flexibles (fig. 129). Sa section, qui est représentée en S sur la gauche de la figure, est une ellipse dont le grand axe est de 11 millimètres et le petit de 4. L'extrémité *a*, qui est ouverte, est fixée à une tubulure à robinet *m*, destinée à mettre l'appareil en communication avec une chaudière à vapeur. L'extrémité *b* est fermée et libre, ainsi que tout le reste du tube.

Le robinet *m* étant ouvert, la pression qui se produit, en vertu de la tension de la vapeur, sur l'intérieur des parois du tube,

Fig. 128.

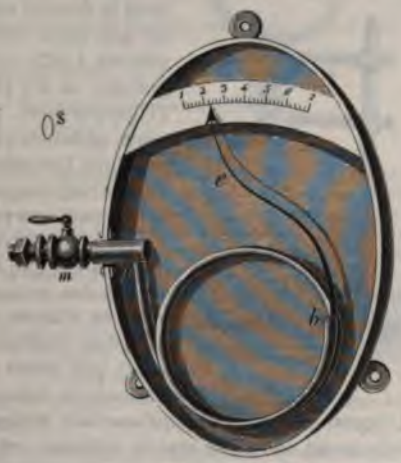


Fig. 129 (h = 26).

le fait se dérouler. L'extrémité *b* est alors entraînée de gauche à droite, et avec elle une longue aiguille *e*, qui indique sur un cadran la tension en atmosphères. Ce cadran se gradue d'avance comparativement à un manomètre à air libre, en faisant marcher simultanément les deux instruments avec de l'air comprimé.

CHAPITRE III

DIFFUSION, OSMOSE ET ABSORPTION DES GAZ

165. **Diffusion ou mélange des gaz.** — Par suite de la force expansive des gaz, leur *diffusion*, ou mélange spontané, est beaucoup plus rapide que pour les liquides (122).

La diffusion des gaz a été démontrée pour la première fois par le chimiste français Berthollet, à l'aide de deux ballons de verre munis chacun d'un robinet et vissés l'un sur l'autre (fig. 130). Les deux ballons étant remplis de gaz bien desséchés, le ballon supérieur d'hydrogène dont la densité est 0,0692, et l'inférieur de gaz acide carbonique dont la densité est 1,529, c'est-à-dire 22 fois plus grande, on les plaça dans les caves de l'Observatoire, pour les préserver de toute agitation et des variations de température. Les robinets ayant été ouverts, l'acide carbonique, malgré son excès de poids, passa en partie dans le ballon supérieur, et, au bout de quelques heures, on constata que les deux ballons contenaient des proportions égales d'hydrogène et d'acide carbonique. Soumis à la même expérience, tous les gaz qui n'ont pas entre eux d'action chimique donnent le même résultat.

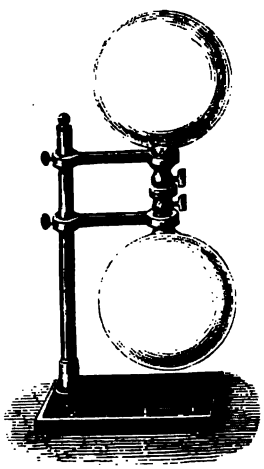


Fig. 130.

L'expérience fait voir qu'une fois mélangés les gaz persistent indéfiniment dans leur état de mélange, et que la diffusion entre deux gaz est d'autant plus prompte, qu'ils diffèrent davantage de densité ; c'est le gaz le plus pesant qui est le moins diffusible. L'hydrogène, par exemple, se diffuse dans une direction descendante environ cinq fois plus vite que l'acide carbonique dans une direction ascendante. Les molécules d'hydrogène, dans un gaz sans mouvement apparent, se dispersent, en 1 minute, à la distance de $0^m,33$.

De ce qui précède découlent les lois suivantes :

1° *Les gaz entre lesquels il n'y a pas action chimique se mé-*

langent rapidement aussitôt qu'ils sont en contact, et leur mélange est uniforme et persistant.

2° *Le mélange de deux gaz est d'autant plus rapide, que la différence de leurs densités est plus grande.*

A ces lois il faut ajouter la suivante, connue sous le nom de *loi de Dalton*, physicien anglais qui, le premier, l'a fait connaître.

3° La température restant constante, *la force élastique du mélange de plusieurs gaz égale la somme des forces élastiques de chacun d'eux, ramenés du volume qu'ils occupaient d'abord au volume total, d'après la loi de Mariotte.*

Cette loi peut encore s'énoncer en disant que, *dans un mélange de plusieurs gaz, la pression exercée par chacun d'eux est la même que s'il était seul.*

La troisième loi est une conséquence de la loi de Mariotte. Pour la vérifier, soient v, v', v'', les volumes de trois gaz sans action chimique les uns sur les autres, f, f', f'', leurs tensions respectives, et V le volume du vase dans lequel on les mélange. Le premier gaz passant du volume v au volume V, acquiert une élasticité x telle, que, d'après la loi de Mariotte, on a $\frac{x}{f}=\frac{v}{V}$; d'où $x=\frac{fv}{V}$. De même la tension du second gaz devient $\frac{f'v'}{V}$, et celle du troisième $\frac{f''v''}{V}$. En représentant par F la somme de ces trois forces élastiques on a

$$F=\frac{fv+f'v'+f''v''}{V}; \quad [1]$$

telle doit donc être aussi la force élastique du mélange. En effet, supposons que le vase dans lequel on fait passer les trois gaz soit une cloche graduée pleine de mercure, assez grande pour qu'ils ne la remplissent pas tout à fait; en représentant par h la hauteur du mercure qui reste encore dans la cloche après qu'on y a fait passer les gaz, et par H la hauteur barométrique au moment de l'expérience, $H-h$ sera la tension du mélange dans la cloche. Or, la température restant constante, on observe toujours que la valeur de $H-h$ est la même que celle de F obtenue par la formule [1] ci-dessus, ce qui vérifie la loi.

Dans le cas où $f=f'=f''$, et où $V=v+v'+v''$, on a

$$F=\frac{f(v+v'+v'')}{v+v'+v''}=f.$$

C'est-à-dire que la pression du mélange est la même que celle des gaz avant d'être mélangés; c'est ce qui avait lieu dans l'expérience de Berthollet.

La diffusion des gaz contribue puissamment à entretenir la pureté de l'air dans l'atmosphère et dans nos habitations, en dispersant au loin les gaz nuisibles à l'économie animale.

* **166. Effusion, transpiration et osmose des gaz.** — Outre la diffusion, on distingue encore dans les mouvements des gaz :

L'*effusion*, ou passage des gaz dans le vide par une très-petite ouverture en mince paroi;

La *transpiration*, ou passage des gaz, par un tube capillaire, dans le vide ou dans une atmosphère raréfiée;

Enfin, l'*osmose*, ou diffusion à travers les diaphragmes.

Les vitesses de diffusion et d'effusion sont sensiblement les mêmes, et les

changements de densité d'un gaz ont peu d'influence sur sa vitesse d'effusion. La vitesse de transpiration est proportionnelle à la pression et en raison inverse de la longueur des tubes, à diamètre égal, mais indépendante de la vitesse de diffusion et de la nature des tubes.

Quant à la diffusion des gaz à travers les membranes et les diaphragmes poreux, c'est un véritable phénomène d'endosmose et d'exosmose (124), qui a été étudié surtout par Graham, à l'aide d'un appareil qu'il a nommé *diffusiomètre*. Celui-ci consiste en un tube de verre de 25 centimètres de longueur et de 22 millimètres de diamètre. Une extrémité est fermée par une plaque d'un demi-millimètre d'épaisseur de graphite comprimé, tel qu'on le prépare pour les crayons, et non de graphite naturel, qui n'est pas assez poreux.

Pour s'opposer d'abord à la diffusion, on fixe sur la plombagine de la gutta-percha, puis, ayant rempli le tube de mercure, on le renverse sur la cuve à mercure, et on fait arriver de l'hydrogène jusqu'à ce que le niveau soit le même à l'intérieur et à l'extérieur. Enlevant alors la gutta-percha, après 50 minutes environ, tout l'hydrogène a passé à travers le graphite et est remplacé par de l'air, mais dont le volume est moindre, un quart seulement, l'hydrogène traversant la plombagine et se diffusant dans l'air extérieur beaucoup plus vite que l'air ne se diffuse dans l'hydrogène à travers la plombagine. Le reste du tube est rempli de mercure dont la hauteur fait connaître la force de transmission réciproque de l'air et de l'hydrogène. Si les deux gaz intérieur et extérieur sont de même densité, il y a pénétration égale dans les deux sens; mais s'ils diffèrent de densités, la pénétration n'est plus la même, et, suivant Graham, *les temps que des volumes égaux de gaz différents mettent à passer à travers le graphite sont proportionnels à la racine carrée des densités*. Toutefois cette loi n'est pas d'accord avec les résultats obtenus par Bunsen avec un diffusiomètre différent de celui de Graham.

Lorsqu'on introduit dans le diffusiomètre un mélange de gaz différents, d'hydrogène et d'acide carbonique par exemple, chacun passe à travers le septum dans la proportion qui lui est propre; de là un moyen de séparer, au moins partiellement, des gaz de densités différentes. Graham a donné à cette méthode d'analyse le nom d'*atmolyse*.

Ce savant admet que dans le passage d'un gaz à travers un septum, comme la plombagine, la terre cuite non vernissée, la force motrice réside dans le mouvement propre des molécules gazeuses (130), celles-ci étant projetées à travers les pores du septum.

Le caoutchouc se laisse aussi pénétrer par les gaz. Graham a observé que l'air séparé par une membrane de caoutchouc d'un espace dans lequel on entretient le vide, passe à travers la membrane, et renferme, après son passage, 40 d'oxygène et 60 d'azote sur 100.

Ce n'est pas seulement vers un espace vide que les gaz passent à travers le caoutchouc, mais aussi vers un espace contenant d'autres gaz. En effet, si l'on remplit un ballon de caoutchouc à minces parois d'acide carbonique, l'oxygène et l'azote de l'air y pénètrent respectivement avec leurs vitesses relatives, tandis que l'acide carbonique s'en dégage graduellement. Toutefois l'oxygène finissant par atteindre à l'intérieur une proportion plus grande qu'à l'extérieur, ce gaz traverse de nouveau le caoutchouc et sort du ballon. Lorsqu'on prend pour diaphragme une vessie mouillée, l'osmose des gaz est modifiée. Dans ce cas, Graham a admis que le gaz qui passe à travers la membrane se dissout d'abord dans l'eau qui la mouille, s'y liquéfie, s'y diffuse ensuite à la manière des liquides (122), puis, s'évaporant sur l'autre face de la membrane, se diffuse enfin à la manière des gaz. La solubilité du gaz dans l'eau est alors l'action prépondérante, qui domine tellement les autres, qu'on peut poser cette loi : *La transmission d'un gaz à travers un septum mouillé d'eau est proportionnelle à la solubilité du gaz dans ce liquide.*

* 167. **Absorption des gaz par les solides.** — Les gaz sont absorbés plus ou moins par tous les corps solides avec lesquels ils sont en contact, mais en proportion très-variable suivant la nature du gaz et celle du solide. Les gaz se condensent surtout à la surface; car, plus on multiplie celle-ci, plus est grand le volume de gaz absorbé.

Éteint sous une cloche remplie d'un gaz donné, le charbon de chêne absorbe, à la pression ordinaire, 90 fois son volume de gaz ammoniac, 35 fois son volume de gaz acide carbonique et 9 fois son volume d'oxygène. Mouillé, le charbon absorbe deux fois moins. De tous les charbons, celui qui a le plus grand pouvoir absorbant est le charbon de noix de coco; le pouvoir absorbant du charbon de sapin est deux fois moindre que celui du charbon de chêne. Le charbon de liége, qui est extrêmement poreux, n'absorbe pas; il en est de même du charbon naturel très-compacte qu'on nomme graphite. On conclut de là que la porosité étant une condition essentielle de l'absorption des gaz, les pores, cependant, doivent être compris dans certaines limites. Un fragment de charbon, saturé d'un gaz et placé dans un autre gaz, perd une partie du premier qui est remplacé par le second.

Le grand pouvoir absorbant du charbon est utilisé dans l'industrie pour la purification des eaux et pour la décoloration des sirops.

L'absorption des gaz par le charbon est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur dû à la condensation du gaz; ce phénomène est surtout sensible avec le platine très-divisé, qui a un pouvoir absorbant considérable. En effet, Dobereiner a observé que lorsqu'on fait arriver un courant d'hydrogène sur de la *mousse* de platine, le dégagement de chaleur est si considérable que le métal est porté au rouge et enflamme l'hydrogène. Le platine en fils fins, ou en lames minces, produit le même effet lorsqu'on multiplie suffisamment la surface de contact avec le gaz.

* 168. **Perméabilité et pouvoir absorbant des métaux à une température élevée; occlusion.** — Portés à une température élevée, plusieurs métaux, comme le fer, le cuivre, l'or, l'argent, le platine, le palladium, acquièrent un grand pouvoir absorbant pour les gaz, et deviennent perméables pour plusieurs d'entre eux, surtout pour l'hydrogène.

C'est M. Henry Sainte-Claire Deville qui, le premier, en 1864, a fait voir que le fer et le platine, à la température rouge, se laissent traverser par l'hydrogène. Depuis, Graham a trouvé que la même propriété se manifeste à un plus haut degré encore dans le palladium à une température inférieure au rouge. De 240 degrés à une température voisine du rouge, l'hydrogène passe abondamment à travers un tube de palladium dans lequel on entretient le vide.

Une feuille de palladium forgé, qu'on maintient d'abord pendant trois heures à une température de 90 à 97 degrés, puis qu'on laisse refroidir lentement dans un courant d'hydrogène, absorbe de ce gaz 643 fois son volume ramené à zéro; même à la température ordinaire, le palladium absorbe 376 fois son volume d'hydrogène, pourvu qu'il ait été porté, dans le vide, à la chaleur rouge.

En fil, le cuivre chauffé au rouge absorbe, en volume, 30 pour 100 d'hydrogène; à l'état d'éponge, 60 pour 100.

Le gaz le plus absorbable par l'argent est l'oxygène. Le fer absorbe surtout l'oxyde de carbone, de 4 à 7 fois son volume, qu'ensuite il conserve indéfiniment. Cette absorption de l'oxyde de carbone par le fer doit nécessairement jouer un rôle important dans l'aciération.

Occlusion. — L'absorption stable d'un gaz par un solide se désigne sous le nom d'*occlusion*. On vient de voir que, dans le fer, cette occlusion s'élève à 7 fois son volume pour l'oxyde de carbone. Avec le platine et l'hydrogène, l'occlusion s'élève à 379 fois le volume de métal; celui-ci conserve le gaz à froid, mais le laisse dégager lorsqu'on le porte à une très-haute température.

D'après la réduction de volume considérable que subissent l'hydrogène, l'oxygène et l'oxyde de carbone dans leur occlusion par les métaux, surtout si l'on

tient compte de la portion de volume occupée par les molécules du métal. Graham admet que ces gaz, quoiqu'au nombre des gaz qui n'ont jamais été liquéfiés (129), existent à l'état liquide dans les métaux, ou à un état de combinaison solide. D'après M. Fabre, l'hydrogène, dans le palladium saturé, est à l'état de combinaison chimique.

Ne pouvant donner ici plus de développement à la diffusion et à l'occlusion des gaz, nous renvoyons le lecteur à la *Physique moléculaire* de l'abbé Moigno, ainsi qu'à une conférence de M. Ed. Becquerel, et à deux de M. Odling, dans la *Revue des cours scientifiques* (nos du 13 janvier 1866, et des 15 juin et 14 décembre 1867).

169. **Absorption des gaz par les liquides.** — L'eau et plusieurs liquides sont doués de la propriété de se laisser pénétrer par les gaz. Mais, dans les mêmes conditions de température et de pression, un même liquide n'absorbe pas des quantités égales de gaz différents. A la température moyenne de 10 degrés et à la pression $0^m,76$, l'eau dissout 25 millièmes de son volume d'azote, 46 millièmes du même volume d'oxygène, un volume égal au sien d'acide carbonique, et 670 fois son volume de gaz ammoniac. Le mercure paraît se refuser entièrement à la pénétration des gaz.

L'expérience démontre que l'absorption des gaz par les liquides a lieu conformément aux lois suivantes :

1° *Pour un même gaz, un même liquide et une même température, le poids de gaz absorbé est proportionnel à la pression*; c'est-à-dire qu'à toutes les pressions, le volume dissous est le même, ou encore que la densité du gaz absorbé est dans un rapport constant avec celle du gaz extérieur non absorbé.

2° *La quantité de gaz absorbée est d'autant plus grande, que la température est plus basse*, c'est-à-dire que la force élastique du gaz est moindre.

3° *La quantité de gaz qu'un liquide peut dissoudre est indépendante de la nature et de la quantité des autres gaz qu'il tient déjà en dissolution.*

En effet, si, au lieu d'un seul fluide élastique, l'atmosphère supérieure au liquide en contient plusieurs, on trouve que chacun de ces gaz, quel qu'en soit le nombre, se dissout dans la même proportion que s'il était seul, en tenant compte toutefois de la pression qui lui est propre. Par exemple, l'oxygène ne formant sensiblement que $\frac{1}{5}$ de l'air, l'eau, dans les conditions ordinaires, absorbe précisément la même quantité d'oxygène que si l'atmosphère était tout entière formée de ce gaz, sous une pression égale à $\frac{1}{5}$ de celle de l'atmosphère.

D'après la première loi, lorsque la pression diminue, la quantité de gaz dissoute doit décroître. En effet, en plaçant une dissolution gazeuse sous la cloche de la machine pneumatique et en faisant le vide, on voit le gaz obéir à sa force expansive et se dégager en bulles. On obtient le même effet par l'élévation de tem-

pérature, car la force élastique du gaz dissous augmente; ou encore, lorsque la dissolution gazeuse est placée dans une atmosphère indéfinie qui ne contient pas les gaz en dissolution, la présence des gaz extérieurs retardant seulement la diffusion des gaz dissous, mais ne l'empêchant pas.

170. **Coefficient d'absorption.** — On nomme *coefficient d'absorption* ou *de solubilité* d'un gaz par rapport à un liquide, *le rapport du volume de gaz qui se dissout au volume du liquide*, le gaz et le liquide étant à zéro, et le volume du gaz absorbé étant ramené à la pression qu'il exerce sur le liquide.

Le coefficient d'absorption varie avec les gaz et les liquides; mais, pour un même gaz et un même liquide, si la température est constante, il est invariable, quelle que soit la pression. Toutefois, si le volume du gaz absorbé est constant, il n'en est pas de même de son poids, qui est toujours proportionnel au coefficient d'absorption du gaz, à sa densité et à la pression.

171. **Problème sur les mélanges des gaz et des liquides.** — Comme application de la première loi des mélanges des gaz et des liquides, soit proposé de calculer quelle est la composition, en volume, de l'air en dissolution dans l'eau, à la température moyenne de 10 degrés, le coefficient d'absorption de l'oxygène à cette température étant 0,046, et celui de l'azote 0,025. Pour cela, soit H la pression atmosphérique; l'air contenant, sur 100 parties en volume, 21 parties d'oxygène et 79 d'azote, la pression de l'oxygène, considéré seul, est $\frac{21H}{100}$, et celle de l'azote $\frac{79H}{100}$. Les volumes de ces deux gaz contenus dans l'eau sont donc entre eux comme les produits $\frac{21H}{100} \times 0{,}046$ et $\frac{79H}{100} \times 0{,}025$; ou, en effectuant les calculs et simplifiant, comme les nombres 966 et 1975. Or la somme de ces deux nombres étant 2941, si l'on représente par x le volume d'oxygène contenu dans 100 parties d'air dissous, on a $\frac{x}{100} = \frac{966}{2941}$, d'où $x = 32{,}84$. L'air dissous dans l'eau est donc beaucoup plus riche en oxygène que l'air atmosphérique, puisqu'il en contient près de 33 pour 100.

172. **Équilibre des fluides dont les diverses parties n'ont pas la même densité.** — L'équilibre ne peut exister dans une masse fluide, soit liquide, soit gazeuse, qu'autant que la pression étant la même sur tous les points de chaque tranche horizontale (82), il en est de même de la densité; autrement, les parties les moins denses s'élèvent dans la masse fluide, à la manière des corps flottants (99), et les plus denses s'abaissent. Par conséquent, pour qu'une masse fluide demeure en équilibre, il faut : 1° que *la densité soit la même pour tous les points d'une couche horizontale;* 2° pour que l'équilibre soit stable, *les couches fluides doivent être disposées par ordre de densités croissantes de haut en bas* (90).

Les gaz et les liquides étant très-dilatables, leur densité dé-

petite masse de plomb un poids égal : l'équilibre, qui avait u auparavant dans l'air, est alors rompu; mais dans le vide se rétablit.

Le principe d'Archimède étant vrai pour les corps plongés dans r, on peut leur appli- er tout ce qui a été dit s corps plongés dans les uides (99); c'est-à-dire lorsqu'un corps est s pesant que l'air, il be, en vertu de l'excès son poids sur la pous- du fluide. S'il est de ne densité que l'air, poids et la poussée bas en haut se font libre, et le corps flot- ans l'atmosphère. En- si le corps est moins que l'air, c'est la sée qui l'emporte, et ps s'élève dans l'at- hère jusqu'à ce qu'il ntre des couches e même densité que lui. La force d'ascension est alors égale ès de la poussée sur le poids du corps. Telle est la cause que la fumée, les vapeurs, les nuages, les aérostats, s'é- dans l'atmosphère.

Fig. 131 (h = 20).

rrection des pesées faites dans l'air. — Les corps perdant dans l'air de leur poids égale au poids de l'air qu'ils déplacent, lorsqu'on pèse ans une balance, ce n'est pas son poids réel, c'est-à-dire dans le vide, nt, mais seulement son poids apparent, à moins toutefois que le vo- rps ne soit précisément le même que celui des poids gradués qui lui re, car alors il y a perte égale des deux côtés.

ître du poids apparent d'un corps son poids réel, soient p son poids rammes, et d sa densité; $\frac{p}{d}$ sera le volume du corps en litres, d'après onnue $P = VD$, et le poids d'un litre d'air étant $0^k,001293$, celui de par le corps est $0^k,001293 \times \frac{p}{d}$. Donc son poids apparent est

$$p - 0^k,001293 \times \frac{p}{d} = p\left(1 - \frac{0^k,001293}{d}\right).$$

tant par P les poids gradués qui font équilibre au corps, par D leur substance, on trouve de même que leur poids appar

$P\left(1-\frac{0^k,001293}{D}\right)$. Mais ces deux poids apparents sont égaux : donc on a

$$p\left(1-\frac{0^k,001293}{d}\right)=P\left(1-\frac{0^k,001293}{D}\right).$$

équation qui donne la valeur de p.

Dans la solution de ce problème, on a supposé la pesée faite à zéro et à la pression $0^m,76$. Pour résoudre la question dans toute sa généralité, on doit tenir compte non-seulement des variations de température et de pression, mais même de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, car elle modifie le poids de l'air déplacé. Cette rigueur dans les pesées n'est pas indispensable quand on pèse des corps très-lourds, comme des métaux; mais elle le devient quand on pèse des gaz ou des vapeurs; aussi cette question sera-t-elle reprise quand on aura vu la dilatation des gaz (318).

AÉROSTATS

175. **Invention des aérostats.** — Les *aérostats*, ou *ballons*, sont des globes d'étoffe légère et imperméable, qui, remplis d'air chaud ou de gaz hydrogène, s'élèvent dans l'atmosphère en vertu de leur légèreté relative.

L'invention des aérostats est due aux frères Étienne et Joseph Montgolfier, fabricants de papier dans la petite ville d'Annonay, où le premier essai eut lieu le 5 juin 1783. Ce premier ballon était un globe de toile doublé de papier, ayant 36 mètres de circonférence et pesant 250 kilogrammes. Ouvert à la partie inférieure, il fut gonflé d'air chaud, en brûlant au-dessous du papier, de la laine, de la paille mouillée.

« A cette nouvelle, écrivait l'académicien Lalande, nous dîmes tous : Cela doit être; comment n'y a-t-on pas pensé? » On y avait bien pensé; mais il y a loin de la conception d'une idée à sa réalisation. Black, professeur de physique à Édimbourg, avait annoncé dans ses cours, en 1767, qu'une vessie remplie d'hydrogène s'élèverait naturellement dans l'atmosphère; mais il ne fit jamais l'expérience, la regardant comme purement amusante. Enfin Cavallo, en 1782, avait communiqué à la Société royale de Londres des expériences qu'il avait faites, et qui consistaient à remplir d'hydrogène des bulles de savon qui s'élevaient d'elles-mêmes dans l'atmosphère, le gaz qui les remplissait étant plus léger que l'air.

Quoi qu'il en soit, les frères Montgolfier ne connaissaient pas l'expérience de Cavallo, ni celle de Black, lorsqu'ils firent leur découverte. Comme ils employèrent exclusivement l'air chaud pour remplir leur ballon, on a donné le nom de *montgolfières* aux ballons à air chaud, pour les distinguer des aérostats à hydrogène, les seuls usités aujourd'hui.

Charles, professeur de physique à Paris, mort en 1823, substitua le gaz hydrogène à l'air chaud. Le 27 août 1783, un ballon aérostatique

lancé au Champ-de-Mars. « Jamais, écrit Mercier, leçon
ue ne fut donnée devant un auditoire plus nombreux et
ıtif. »

un nombre considérable d'ascensions ont été exécutées.
ût Gay-Lussac, en 1804, fut la plus remarquable par les
elle a enrichi la science, et par la hauteur qu'atteignit
physicien, hauteur qui fut de 7 016 mètres au-dessus
des mers. A cette hauteur, le baromètre était descendu
mètres, et le thermomètre centigrade, qui marquait 31
surface du sol, était à 9°,5 au-dessous de zéro.

s hautes régions, la sécheresse était telle, le jour de l'as-
Gay-Lussac, en juillet, que les substances hygrométri-
es que le papier, le parchemin, se desséchaient et se tor-
mme si on les eût présentées au feu. La respiration et la
n du sang s'accélèrent à cause de la grande raréfaction
Gay-Lussac a constaté que son pouls faisait alors 120
, au lieu de 66, qui était son état normal. A cette grande
le ciel prend une teinte bleue très-foncée, tirant sur le
n silence absolu et solennel entoure l'aéronaute.

e la cour du Conservatoire des arts et métiers, Gay-
scendit auprès de Rouen, au bout de six heures, ayant
on trente lieues.

ension remarquable est celle que firent à Londres, en
. Coxwell et Glaisher.

uteur de 9 200 mètres, la raréfaction de l'air devint telle.
d si intense, que M. Glaisher tomba en faiblesse, ne
outenir ni ses bras ni sa tête, ne distinguant plus ses
ıts et ayant perdu l'usage de la parole. M. Coxwell, qui
ervé plus de force, put encore observer le baromètre et
mètre, et si, dans un pareil moment, ses observations
re précises, le ballon avait atteint la hauteur de 10 460
t le thermomètre était descendu à — 27 degrés. Voici
ratures observées par les deux aéronautes :

m		m	
0.	0°	A 8 000.	— 19°
0.	— 8	8 850.	— 21
0.	— 13	10 460.	— 27

nstruction, remplissage et ascension des aérostats. — L'en-
es aérostats est formée de longs fuseaux de taffetas cou-
nble et enduits d'un vernis au caoutchouc qui rend le
erméable au gaz. Au sommet du ballon est une soupape
ır un ressort, et que l'aéronaute peut ouvrir à volonté
'une corde. Une nacelle d'osier, dans laquelle peuvent

se placer plusieurs personnes, pend au-dessous du ballon, soutenue par un filet de corde qui enveloppe celui-ci en entier.

Un ballon de dimension ordinaire, pouvant enlever facilement trois personnes, a environ 15 mètres de hauteur, 11 mètres de diamètre, et son volume, quand il est gonflé complétement, est de près de 700 mètres cubes. L'enveloppe pèse 100 kilogrammes, et on gonfle les ballons, soit avec l'hydrogène pur, soit avec le gaz

Fig. 132 (h = 15m).

d'éclairage. Bien que ce dernier gaz soit plus dense que le premier, on l'emploie généralement aujourd'hui, parce qu'on l'obtient plus facilement et à meilleur compte que l'hydrogène pur. Il suffit, en effet, de le faire arriver de l'usine à gaz la plus voisine jusqu'à l'aérostat, au moyen d'un conduit de toile gommée.

La figure 132 représente un ballon gonflé d'hydrogène pur. Sur le droite du dessin est une suite de tonneaux dans lesquels sont des copeaux de fer, de l'eau et de l'acide sulfurique, substances nécessaires pour la préparation de l'hydrogène. De chaque tonneau le gaz se rend sous un tonneau central, défoncé à la partie inférieure et plongeant dans une cuve remplie d'eau. Le gaz, après

'être lavé dans cette eau, se rend dans l'aérostat par un long tube e toile, fixé par un bout au tonneau central, et par l'autre à 'aérostat. A mesure que le ballon se remplit, des hommes le re-ennent au moyen de cordes xées au filet. Il ne reste plus u'à enlever le tube qui a ervi à amener le gaz. L'aéro-aute se place enfin dans la acelle; au cri de *lâchez tout!* n lâche les cordes, et le allon s'élève avec une vitesse 'autant plus grande, qu'il est lus léger par rapport à l'air éplacé (fig. 133).

Fig. 133.

Il importe de ne pas gon-er un ballon complétement; r la pression atmosphérique iminuant à mesure qu'il s'é-ve, le gaz intérieur se dilate tend à le faire crever.

Il suffit que la force d'as-nsion, c'est-à-dire l'excès poids de l'air déplacé sur poids total de l'appareil, it de 4 à 5 kilogrammes. est à remarquer que cette rce reste constante tout le mps que le ballon n'est pas mplétement gonflé par la di-tation du gaz intérieur. En fet, si la pression atmosphé-que est devenue, par exem-e, deux fois plus petite, le z de l'aérostat, d'après la i de Mariotte, a doublé de lume. Il en résulte que le lume d'air déplacé est lui-ème devenu deux fois plus grand; d'ailleurs sa densité est deux is moindre; donc son poids, et, par suite, la poussée de bas haut, n'ont pas changé. Mais une fois que le ballon est complé-ment gonflé, s'il continue à s'élever, la force d'ascension dé-roit; car, le volume d'air déplacé restant le même, sa densité di-inue. Il vient donc un moment où la poussée est égale au poids du

ballon. Celui-ci ne fait alors que suivre une direction horizontale, emporté par les courants d'air qui règnent dans l'atmosphère.

Ce n'est que d'après les indications du baromètre que l'aéronaute sait s'il monte ou s'il descend. Dans le premier cas, la colonne de mercure s'abaisse; elle s'élève dans le second. C'est à l'aide du même instrument qu'il évalue la hauteur à laquelle il se trouve. Une longue banderole fixée à la nacelle (fig. 133) indique aussi, par la position qu'elle prend au-dessous ou au-dessus de celle-ci, si l'on monte ou si l'on descend.

Lorsque l'aéronaute veut opérer sa descente, il tire la corde qui ouvre la soupape placée à la partie supérieure du ballon; l'hydrogène se mélange alors avec l'air extérieur, et le ballon baisse. Au contraire, pour ralentir la descente, lorsqu'elle est trop rapide, ou pour remonter, si elle s'effectue dans un endroit périlleux, l'aéronaute vide des sacs de toile pleins de sable, dont il a soin de se munir en quantité suffisante. Ainsi allégé, le ballon s'élève de nouveau pour descendre ensuite dans un lieu plus propice.

Les aérostats n'ont pas eu jusqu'ici d'applications importantes. A la bataille de Fleurus, en 1794, on fit usage d'un ballon captif, c'est-à-dire retenu par une corde, dans lequel était placé un observateur qui faisait connaître par des signaux les mouvements de l'ennemi. Plusieurs ascensions ont aussi été entreprises dans le but de faire des observations météorologiques dans les hautes régions de l'atmosphère. Mais les aérostats ne pourront être d'une véritable utilité que le jour où l'on pourra les diriger. Les tentatives faites jusqu'ici dans ce but ont complétement échoué. On n'a aujourd'hui d'autre ressource que de s'élever jusqu'à ce qu'on rencontre un courant d'air qui porte plus ou moins dans la direction qu'on veut suivre.

177. **Parachute.** — Le *parachute* a pour objet de permettre à l'aéronaute d'abandonner son ballon, en ralentissant la vitesse de chute. Cet appareil est formé d'une vaste toile circulaire (fig. 134) d'environ 5 mètres de diamètre, qui, par l'effet de la résistance de l'air, s'étend en forme d'un vaste parapluie, et ne tombe que lentement. Sur le contour sont fixées des cordes qui soutiennent une nacelle où se place l'aéronaute. Au centre du parachute est une ouverture par laquelle s'échappe l'air comprimé par l'effet de la descente; autrement il se produit des oscillations qui se communiquent à la nacelle et peuvent être dangereuses.

Dans la figure 133, on voit, sur le côté du ballon, un parachute plié et attaché au filet au moyen d'une corde passant sur une poulie pour venir se fixer à une petite nacelle placée dans la grande. Il

suffit de lâcher cette corde pour que le parachute et sa nacelle abandonnent l'aérostat.

C'est J. Garnerin qui, le premier, descendit en parachute; mais c'est Blanchard qui paraît en être l'inventeur.

Fig. 134.

178. **Calcul du poids que peut enlever un ballon.** — Pour calculer le poids que peut enlever un ballon dont les dimensions sont données, supposons-le parfaitement sphérique, et rappelons que les formules qui donnent le volume et la surface de la sphère en fonction du rayon sont $V=\frac{4\pi R^3}{3}$, et $S=4\pi R^2$, π étant le rapport de la circonférence au diamètre et égal à 3,1416. Le rayon R étant mesuré en décimètres, soient, en kilogrammes, p le poids du mètre carré du taffetas dont le ballon est formé, P le poids de la nacelle et de ses accessoires, a le poids d'un litre d'air à zéro et à la pression 0,76, et a' le poids d'un litre d'hydrogène dans les mêmes conditions. Le poids total de l'enveloppe, en kilogrammes, est représenté par $\frac{4\pi R^2 p}{100}$; celui de l'hydrogène par $\frac{4\pi R^3 a'}{3}$; et celui de l'air déplacé par $\frac{4\pi R^3 a}{3}$; c'est la poussée. En représentant par X le poids que le ballon peut porter, on a donc

$$X=\frac{4\pi R^3 a}{3}-\frac{4\pi R^3 a'}{3}-\frac{4\pi R^2 p}{100}-P,$$

$$\text{ou}\quad X=\frac{4\pi R^3}{3}(a-a')-\frac{4\pi R^2 p}{100}-P.$$

Toutefois, comme on l'a vu ci-dessus, afin que le ballon s'élève, on doit prendre pour X une valeur plus petite de 5 kilogrammes environ que celle obtenue par cette équation. Il y a aussi, en général, des corrections de température et de pression à faire au poids de l'air et de l'hydrogène; enfin, on doit tenir compte de ce que le ballon n'est jamais complétement gonflé au départ, ce qui revient à lui donner un volume moindre que celui calculé par la formule $\frac{4\pi R^3}{3}$.

CHAPITRE V

APPAREILS FONDÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'AIR

179. **Machine pneumatique.** — La *machine pneumatique* sert à faire le vide dans un espace donné, ou, plus rigoureusement, sert à raréfier l'air, car elle ne peut donner le vide absolu.

Cette machine a été inventée par Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg, en 1650, peu d'années après l'invention du baromètre. Ce physicien ne donna à sa machine qu'un seul corps de pompe. C'est Hawksbee, physicien anglais, qui, le premier, adopta deux corps de pompe, et rendit ainsi la manœuvre de la machine plus prompte et moins pénible; car les pressions exercées par l'atmosphère sur les deux pistons se faisant équilibre, on n'a à vaincre que la différence des pressions exercées en dessous des pistons par la tension de l'air qui se trouve dans les corps de pompe.

La figure 135 donne une vue perspective d'une machine pneumatique à deux corps de pompe. Les figures 136 à 142 en donnent des coupes et projections suivant différents plans; dans toutes, les mêmes pièces sont désignées par les mêmes lettres.

La machine se compose d'une épaisse plate-forme de laiton VGL (fig. 136), fixée horizontalement sur une table. A une de ses extrémités sont solidement mastiqués deux cylindres de cristal, dans lesquels sont deux pistons de cuir P, P'; ces cylindres sont les *corps de pompe*. A l'autre extrémité, la plate-forme se termine par une *platine* V, sur laquelle est mastiquée une glace de verre dépolie et bien dressée. C'est sur celle-ci que se place le *récipient* R, dans lequel on fait le vide. Au centre de la platine est une tubulure *n*, à pas de vis, sur laquelle on adapte à volonté des ballons de verre à robinet, ou tous autres vases dans lesquels on veut faire le vide. La communication entre le récipient et les corps de pompe est établie par un conduit *nc* pratiqué dans la plate-forme, comme le montre la figure 136, qui est une coupe longitudinale de la machine. En arrivant aux corps de pompe, le conduit se bifurque pour atteindre leurs bases en *c* et en *d* (fig. 139).

La figure 137, qui représente une coupe verticale de la machine suivant l'axe des deux cylindres, fait voir le mécanisme à l'aide duquel on imprime un mouvement alternatif aux pistons. A ceux-ci sont fixées des crémaillères K et H, dans lesquelles engrène un

Fig. 135 (h=70).

pignon X. En faisant tourner ce pignon alternativement en sens contraire, au moyen d'une manivelle MN, une crémaillère monte et l'autre descend, et avec elles les pistons.

La figure 138 donne, sur une plus grande échelle, la coupe verticale de l'un des pistons. Il se compose de deux disques de laiton A et B, entre lesquels sont des rondelles de cuir ouvertes à leur centre et imbibées d'huile de pied de bœuf. Le disque B est surmonté d'une tubulure qui traverse toutes les rondelles, et sur cette tubulure est un pas de vis sur lequel se serre un écrou qui comprime fortement le disque A et les rondelles. Celles-ci, d'un diamètre un peu plus grand que les disques A et B, glissent

à frottement doux contre les parois du corps de pompe, qu'elles ferment hermétiquement. Intérieurement à la tubulure centrale est vissée une pièce D, sur laquelle se fixe par un boulon la crémaillère qui fait mouvoir le piston. La pièce D est percée, dans toute

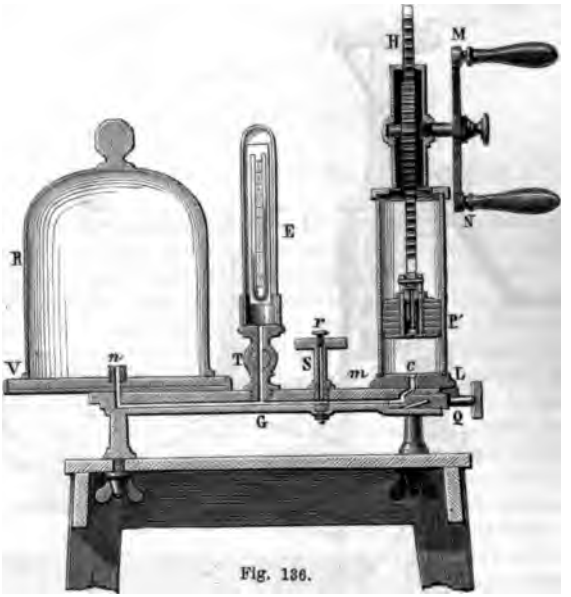
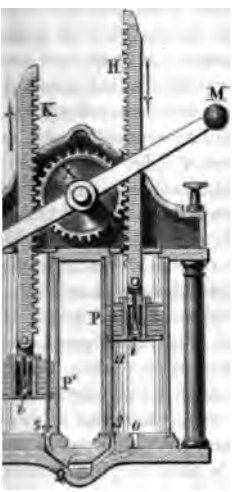


Fig. 136.

sa hauteur, d'un conduit destiné à laisser passer l'air de la partie inférieure du corps de pompe au-dessus du piston, et de là dans l'atmosphère, les corps de pompe n'étant pas fermés à leur partie supérieure. Enfin, au centre du disque B est un trou *i* fermé par une soupape métallique Z, qui ouvre de bas en haut. A cette soupape, représentée à gauche de la figure 138, est fixée une tige *e* qui s'engage librement dans le conduit de la pièce D. Cette disposition a pour but d'empêcher la soupape de chavirer lorsqu'elle est soulevée. A la partie inférieure de la soupape est un disque de liége *x* qui s'applique sur l'orifice *i* et le ferme.

Outre la soupape Z placée à l'intérieur du piston, une soupape conique *s* sert à fermer, à la base du corps de pompe, l'orifice *c* du conduit *cn* qui se rend au récipient (fig. 136). Cette soupape est fixée à l'extrémité inférieure d'une tige de fer *a* (fig. 138), qui traverse tout le piston, et se prolonge jusqu'au sommet du corps de

La tige *a* pouvant glisser à frottement dur dans les ron-
e cuir du piston, il en résulte que, lorsque celui-ci descend,
ine avec lui la tige de fer et fait fermer la soupape *s*; s'il
la tige et la soupape sont soulevées, mais d'une très-petite
, parce que cette tige a une longueur telle, qu'elle vient



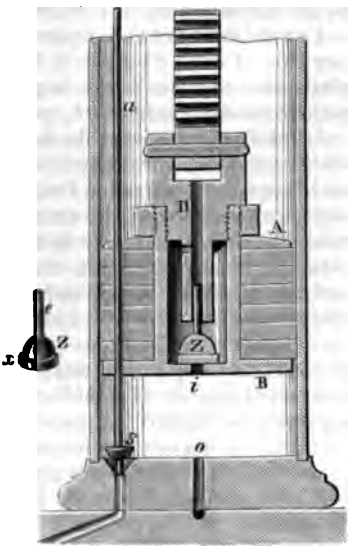


Fig. 137. Fig. 138.

ut de suite contre le plateau supérieur du corps de pompe.
le ne fait plus que glisser dans le piston, qui s'élève seul.
compléter la description de la machine pneumatique, il
ste à faire connaître l'usage de trois robinets T, S, Q, pla-
cette machine (fig. 135 et 136). Le robinet T sert à faire
niquer par le conduit *cn*, comme on le voit dans la figure
récipient R avec une éprouvette E, qui sera décrite ci-
80). Quant au robinet S, encore par le même conduit *cn*,
t ou interrompt la communication entre le récipient et les
e pompe. Lorsque ceux-ci fonctionnent, le robinet S doit
vert (fig. 136 et 139), et alors l'air est aspiré du récipient;
ie fois que le vide est fait dans ce dernier, comme l'air
ujours à rentrer par les corps de pompe, on tourne le ro-
d'un quart de tour (fig. 141), et l'air ne peut plus pénétrer
récipient qu'en s'infiltrant entre ses bords et la platine.

C'est pourquoi ces bords doivent être dressés avec soin pour obtenir le contact le plus parfait ; mais cela serait insuffisant, il faut encore, avant de les appliquer sur la platine, les enduire de suif. Le récipient, ainsi disposé, *tient le vide* des mois entiers.

Le robinet S est percé, suivant son axe, d'un conduit dont on ferme hermétiquement l'orifice à l'aide d'un bouchon métallique *r*. Le vide étant fait dans le récipient, lorsqu'on veut y faire rentrer l'air, il suffit d'enlever le bouchon *r*. Le troisième robinet Q, placé entre les deux corps de pompe, est destiné à ce qu'on appelle le *double épuisement*, que nous décrivons ci-après.

Les différentes parties de la machine connues, voici comment elle fonctionne ; soit d'abord le piston P' (fig. 137 et 138) au bas de sa course ; à l'instant où l'on commence à faire marcher la manivelle, ce piston monte, entraînant avec lui la tige *a* et la soupape *s*, tandis que la soupape Z reste fermée par son propre poids et par celui de l'atmosphère. Si la soupape *s* restait fermée pendant l'ascension du piston, le vide se ferait au-dessous de celui-ci ; mais la communication entre le corps de pompe et le récipient étant établie par cette soupape, une partie de l'air du récipient passe dans le corps de pompe et le remplit lorsque le piston est arrivé au haut de sa course. Si actuellement celui-ci s'abaisse, le jeu des soupapes est changé : la soupape *s* se fermant par la descente de sa tige, l'air qui est sous le piston ne peut retourner dans le récipient ; mais se trouvant comprimé de plus en plus, à mesure que le piston descend, il acquiert bientôt une tension plus grande que la pression qui s'exerce sur la soupape Z. Celle-ci s'ouvre alors, et l'air qui est sous le piston s'échappe dans l'atmosphère par le conduit D. A un second coup de piston, la même série de phénomènes se renouvelle jusqu'à ce qu'on atteigne une limite où, quoiqu'il reste encore de l'air dans le récipient, la soupape du piston refuse de s'ouvrir, quand il arrive au bas de sa course. En effet, quelque bien exécutée que soit une machine, on ne peut éviter, au-dessous des soupapes et sur le contour du disque inférieur du piston, un *espace nuisible* où se loge une petite quantité d'air. Par suite, lorsque la raréfaction est poussée assez loin, il arrive un moment où, lors même que le piston vient s'appliquer sur la base du corps de pompe, l'air qui reste enfermé dans l'espace nuisible n'acquiert pas une tension suffisante pour soulever la soupape ; à partir de cet instant, la machine ne fonctionne plus. Nous décrirons ci-après (181), sous la dénomination de *double épuisement*, une disposition de robinet qui permet de pousser le vide plus loin, sans pouvoir toutefois donner le vide absolu.

Du reste, ce n'est pas seulement pratiquement, c'est aussi théo-

quement que la machine pneumatique ne peut faire le vide absolu. En effet, le volume de chaque corps de pompe, diminué de lui du piston, étant, par exemple, de 1 litre, et celui du récient de 20 litres, lorsque le piston est arrivé au haut de sa course, volume d'air, qui était 20, est 20 plus 1 ou 21; on extrait donc, chaque coup de piston, seulement $\frac{1}{21}$ de la masse de l'air qui se ouve dans le récipient, et par conséquent on ne peut jamais enver tout l'air qu'il contient.

180. Éprouvette.— Lorsque la machine a fonctionné un certain mps, on mesure la force élastique de l'air qui reste dans le répient par la différence de niveau du mercure dans les deux branes d'un tube de verre recourbé en siphon, l'une d'elles étant rmée et l'autre ouverte, comme dans le baromètre. Ce petit insument, qu'on nomme *éprouvette* ou *baromètre tronqué*, parce ie c'est un véritable baromètre à siphon qui a moins de 76 centièmes de hauteur, est fixé sur une échelle divisée en millimèes, et placé sous une cloche de cristal E (fig. 136), qui commuque avec le récipient par le robinet T. Enfin, la branche fermée la partie courbe du tube sont d'avance remplies de mercure.

Avant qu'on commence à aspirer l'air qui est sous le récipient, force élastique fait équilibre au poids de la colonne de mercure ii est dans la branche fermée, et celle-ci reste pleine; mais, à esure que l'air est raréfié par le jeu des pistons, la force élastique minue, et bientôt elle ne peut plus faire équilibre au poids de la lonne de mercure. Celle-ci baisse alors, et le mercure tend à se ettre de niveau dans les deux branches. Si l'on arrivait à faire le de absolu, le niveau s'établirait exactement; car il n'y aurait de ession ni d'un côté ni de l'autre. Mais, avec les meilleures maines, le niveau reste toujours plus élevé d'un demi-millimètre i moins dans la branche fermée, ce qui indique que le vide n'est is parfait, puisqu'il reste encore une quantité d'air dont la tenon fait équilibre à une colonne de mercure d'un demi-millièmètre. On dit alors qu'on a fait le vide à un demi-millimètre.

181. Robinet à double épuisement. — On nomme ainsi le ronet Q, placé entre les deux corps de pompe (fig. 135, 136 et 139 142), parce qu'il permet de pousser la raréfaction de l'air à un ès-haut degré. Ce robinet est placé à la bifurcation du canal qui nduit l'air du récipient aux deux corps de pompe; il est percé, ns sa masse, de plusieurs conduits qu'on utilise successivement i le tournant dans deux positions rectangulaires.

Dans la figure 139, qui donne une coupe horizontale du robinet, établit, par un conduit central et par deux conduits latéraux, la mmunication entre le récipient et les corps de pompe de *n* en c

et en *d*, et la machine fonctionne alors comme il a été dit ci-dessus. Lorsqu'elle ne fonctionne plus, c'est-à-dire lorsque les soupapes Z refusent de s'ouvrir, on tourne le robinet Q de 90 degrés (fig. 141). A partir de ce moment, les communications sont changées, comme le montrent, en coupes horizontales, les figures 139 et 141, et, en coupes verticales, les figures 140 et 142. De nouveaux conduits du robinet correspondent maintenant à ceux de la

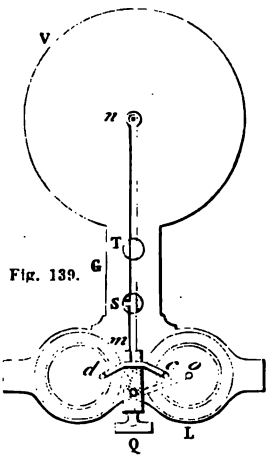


Fig. 139.

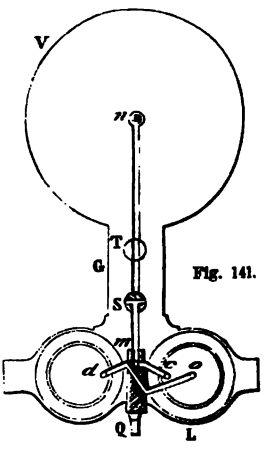


Fig. 141.

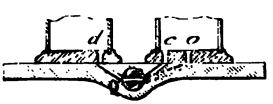


Fig. 140.

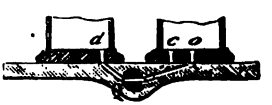


Fig. 142.

plate-forme, et le corps de pompe de droite communique seul avec le récipient par le conduit *nmc* (fig. 141), tandis que celui de gauche se trouve mis en communication, par un conduit qui traverse obliquement le robinet, avec une ouverture centrale *o*, pratiquée à la base du corps de pompe de droite, et toujours ouverte.

Cela posé, le piston de droite, se soulevant, aspire l'air du récipient; mais, lorsqu'il descend, l'air qui vient d'être aspiré est refoulé dans le corps de pompe de gauche par les orifices *o* et *d*, ce dernier étant alors ouvert, puisque la soupape conique qui lui correspond est soulevée. Lorsque ensuite le piston de droite remonte, celui de gauche s'abaisse; mais l'air qui est au-dessous ne retourne pas dans le corps de pompe de droite, parce que l'orifice *d* est

lenant fermé par la soupape conique. Le piston de droite con-
nt ainsi à aspirer l'air du récipient et à le refouler dans le
de pompe de gauche, l'air s'accumule dans celui-ci, et finit
prendre la tension suffisante pour soulever la soupape Z du
, ce qui était impossible avant que le robinet Q fût tourné.
st qu'en faisant ainsi usage du robinet à double épuisement
arrive à faire le vide à un demi-millimètre.

. **Modification de la machine pneumatique.** — M. Ducrétet,
ucteur à Paris, a modifié récemment la machine pneuma-
en adoptant des pistons pleins, et en plaçant les soupapes

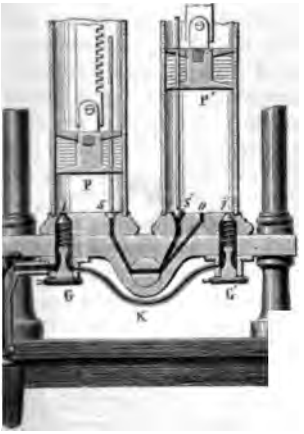


Fig. 143.

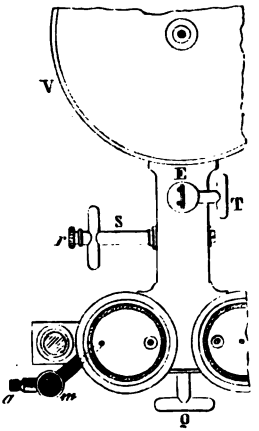


Fig. 144.

ulsion *ii'* dans les patins qui servent de base aux corps de
e, rien n'étant changé aux soupapes d'aspiration et aux
pièces de la machine (fig. 143 et 144).

premier avantage de cette disposition est de pouvoir retirer
a plus grande facilité les soupapes *ii'* des cavités dans les-
s elles sont placées : il suffit, en effet, de dévisser deux
ns GG' qui les maintiennent à l'aide de ressorts à boudin ;
que, dans la machine ordinaire, il faut démonter une par-
s pièces et retirer les pistons des corps de pompe.

tube K met en communication les deux cavités qui con-
nt les soupapes d'expulsion, et l'air refoulé s'échappe par
ntage *a*. Une boîte *m* reçoit l'huile dont on recouvre les
s, et qui s'infiltre toujours plus ou moins entre ceux-ci et
rois des corps de pompe. Avant de faire fonctionner la ma-

chine, on a soin de faire sortir l'huile de la boîte *m* en dévissant un bouton *n* placé à sa partie inférieure. Pour diminuer l'infiltration de l'huile entre les pistons et les parois des corps de pompe, il est utile, après que la machine a fonctionné, de faire rentrer l'air sous les pistons, ce qui s'obtient à l'aide du robinet S (fig. 144).

Un second avantage de la machine nouvelle est qu'elle peut servir de machine de compression (187). Il suffit, pour cela, de relier par un raccord le récipient dans lequel on veut comprimer l'air à l'ajutage *a*. On peut alors aller jusqu'à 5 atmosphères.

183. **Usages de la machine pneumatique; fontaine dans le vide.** — On a déjà fait connaître un grand nombre d'expériences faites

Fig. 145.

Fig. 146.

à l'aide de la machine pneumatique. Telles sont celles de la pluie de mercure (16), de la chute des corps dans le vide (56), de la vessie dans le vide (131), du crève-vessie (139), des hémisphères de Magdebourg (139) et du baroscope (173).

La machine pneumatique sert encore à démontrer que l'air, par l'oxygène qu'il contient, est nécessaire à l'entretien de la combustion et de la vie. En effet, si l'on place sous le récipient un corps enflammé, une bougie, par exemple, on voit la flamme pâlir à me-

sure qu'on fait le vide, puis s'éteindre. Les mammifères et les oiseaux périssent presque instantanément dans le vide. Les poissons et les reptiles supportent beaucoup plus longtemps la privation de l'air. Les insectes vivent plusieurs jours dans le vide.

Dans le vide, les substances fermentescibles se conservent sans altération pendant un temps très-long, n'étant pas en contact avec l'oxygène, qui est nécessaire à la fermentation. Des aliments renfermés dans des boîtes hermétiquement closes, d'où l'on a chassé l'air, se conservent plusieurs années.

La *fontaine dans le vide* est un globe de verre A (fig. 145), très-allongé et muni à sa base d'une garniture à robinet, avec une tubulure qui s'élève à l'intérieur. Ayant vissé ce globe sur la machine pneumatique, et fait le vide, on ferme le robinet, puis on porte l'appareil dans un vase R contenant de l'eau. Ouvrant alors le robinet, la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau la fait jaillir par la tubulure, comme le montre le dessin.

Enfin, la figure 146 représente une expérience qui montre l'effet de la pression atmosphérique sur le corps humain. Un manchon de verre, ouvert à ses deux extrémités, étant posé sur la platine de la machine, on place la paume de la main sur ses bords, et une autre personne fait le vide. Alors la pression atmosphérique ne se faisant plus équilibre sur les deux faces de la main, celle-ci est fortement pressée sur les bords du manchon, et ce n'est qu'avec effort qu'on peut l'en retirer. De plus, l'élasticité des fluides que contiennent les organes n'étant plus contre-balancée par le poids de l'atmosphère, la paume de la main se gonfle, et le sang tend à sortir par les pores.

184. Problèmes sur la machine pneumatique. — I. Calculer la tension de l'air sous le récipient de la machine pneumatique après n coups de piston.

Soient V le volume du récipient, v celui du corps de pompe, déduction faite de l'espace occupé par le piston, et H la pression atmosphérique extérieure. La machine n'ayant pas encore fonctionné, et le piston étant au bas de sa course, on a sous le récipient un volume d'air V à la pression H. Or, lorsque le piston est arrivé au haut de sa course, ce volume devient $V+v$, et la tension H prend une valeur H' qu'on détermine en posant, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{H'}{H}=\frac{V}{V+v}, \quad \text{d'où } H'=H\frac{V}{V+v}.$$

Lorsque le piston s'abaisse, le volume d'air v est expulsé, et l'on a sous le récipient le même volume d'air V, mais à la tension H'. Puis à la deuxième ascension du piston, le volume d'air devient de nouveau $V+v$ à une tension H'' telle, que, comme ci-dessus, $H''=H'\frac{V}{V+v}=H\left(\frac{V}{V+v}\right)^2$.

A la troisième ascension du piston, on trouve de même que la pression sous le récipient est $H\left(\frac{V}{V+v}\right)^3$, et ainsi de suite, d'où l'on conclut qu'après le $n^{\text{ième}}$ coup de piston, elle est enfin $H\left(\frac{V}{V+v}\right)^n$ [1].

L'expression $\frac{V}{V+v}$ est nécessairement une fraction, et l'on sait que les puissances d'une fraction sont d'autant plus petites, que le degré en est plus élevé. Par suite, d'après la formule [1], plus n sera grand, plus la force élastique sous le

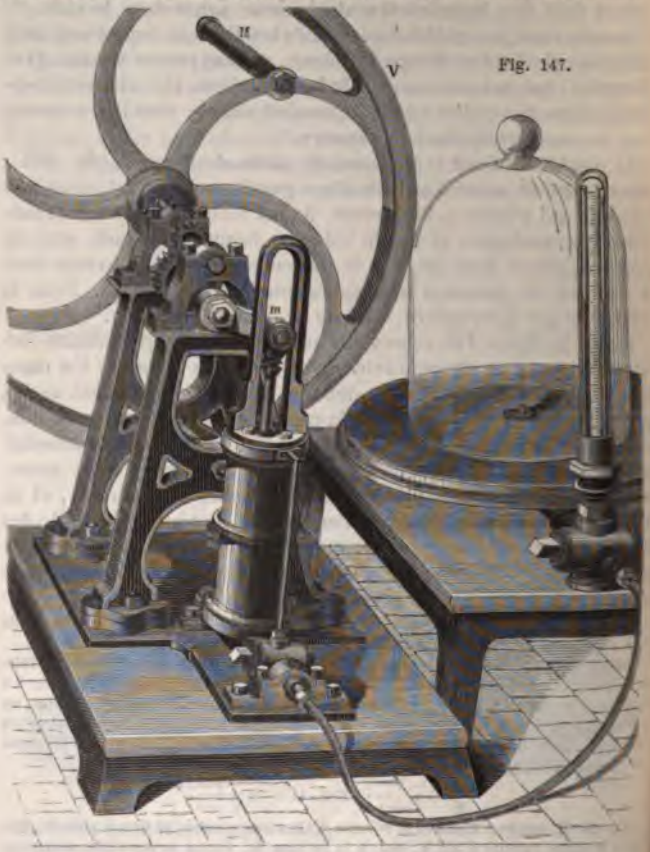


Fig. 147.

récipient sera petite; mais ce n'est que lorsque n sera infini, que la fraction $\left(\frac{V}{V+v}\right)^n$ sera nulle. D'où l'on conclut que théoriquement, comme pratiquement, il est impossible de faire le vide absolu avec la machine pneumatique.

II. Calculer le poids de l'air qui reste sous le récipient après n coups de piston.

Cette question est facile à résoudre en s'appuyant sur la formule [1] ci-dessus. En effet, soient P le poids de l'air sous le récipient avant que la machine ait

[redacted]

t p ce poids après n coups de piston. Les poids étant proportion-
sions, on a

$$\frac{\left(\frac{V}{V+v}\right)^n}{H}, \quad \text{ou} \quad \frac{p}{P}=\left(\frac{V}{V+v}\right)^n, \quad \text{d'où} \quad p=P\left(\frac{V}{V+v}\right)^n.$$

sait déjà (159, prob. III) que sa valeur est donnée par la formule

$$\frac{H\times V}{}.$$

$$\text{Donc} \quad p=\frac{1^{gr},293\times H\times V}{76}\left(\frac{V}{V+v}\right)^n \text{[2]}.$$

lution de cette question, on a supposé que la température était
zéro. Si elle variait, on verra,
la dilatation des gaz, la modi-
orter à la formule [2].

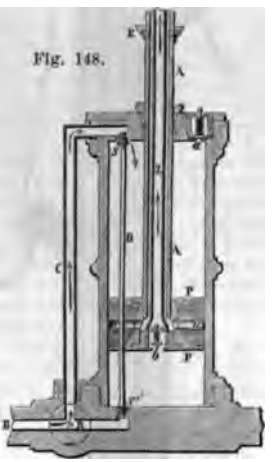


Fig. 148.

hine pneumatique à double
chi. — M. Bianchi, construc-
adopté un système de machine
qui présente plusieurs avan-
achine, qui est toute de fonte,
l cylindre, oscillant sur un axe
é à sa base (fig. 147). Sur un
est monté un arbre horizon-
olant très-lourd V, qu'on fait
e d'une manivelle M. A ce même
une manivelle m qui s'articule
la tige du piston. Par suite, à
ation complète du volant, le
eux oscillations sur son axe.
est à double effet, c'est-à-dire
fait le vide en montant et en
our cela, il porte une soupape
uvrant de bas en haut, comme
ne ordinaire; mais la tige AA
ans son intérieur est un tube X,
ge, qui donne issue à l'air qui
upape b. Au haut du cylindre est une seconde soupape a, ouvrant
haut. Enfin, une tige de fer D traverse à frottement dur le piston,
à ses extrémités par deux soupapes coniques s et s'. Celles-ci ser-
ation par le tube BC qui se rend au récipient où l'on fait le vide,
soupapes a et b servent à l'expulsion de l'air.
connus, supposons que le piston descende. La soupape s' est alors
soupape s étant ouverte, l'air du récipient se rend au-dessus du
qu'en dessous l'air comprimé par celui-ci soulève la soupape b et
le tube X, qui communique avec l'atmosphère. Quand le piston
iration se fait par s', et la soupape s étant fermée, l'air comprimé
la soupape a.
possède un robinet à double épuisement R, semblable à celui
81). Elle est en outre munie d'un système de graissage particu-
a, un godet E (fig. 148), fixé à la tige, est rempli d'huile qui
espace annulaire compris entre la tige AA et le tube X; de là elle
un petit tube oo pratiqué dans la masse du piston, et, refoulée
n atmosphérique, elle se distribue d'une manière permanente sur
piston. Étant toute de fonte, cette machine peut recevoir des di-

mensions beaucoup plus grandes que la machine ordinaire à deux pistons, et faire le vide en bien moins de temps, dans des appareils plus grands.

* 186. **Machine pneumatique à mercure.** — On nomme ainsi des machines dans lesquelles on utilise le vide barométrique pour obtenir un vide beaucoup

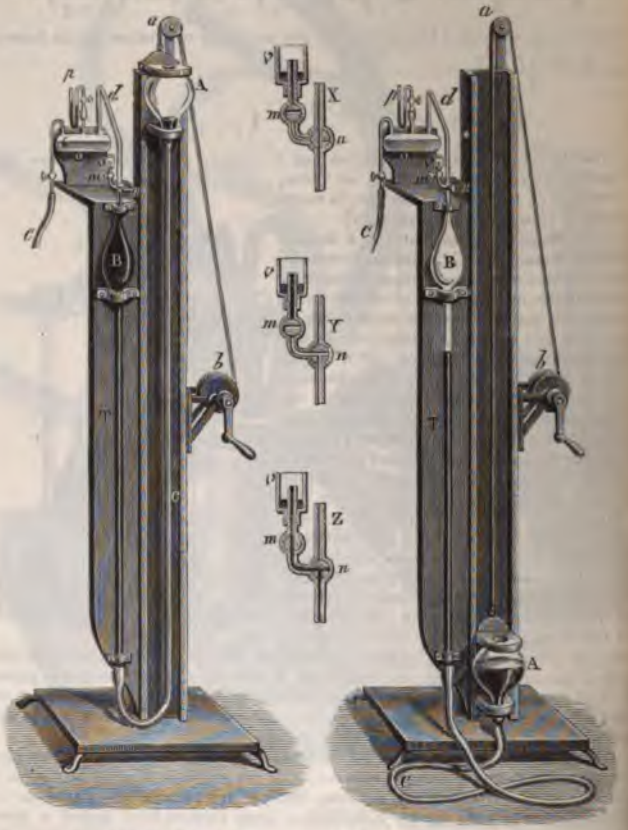


Fig. 149 (h = 1m,80). Fig. 150.

plus complet qu'avec les machines à piston. On a imaginé plusieurs sortes de machines à mercure, telles que la machine de Geissler, l'aspirateur de Sprengel, la machine de Ladd, etc. Celle que nous donnons ici est un perfectionnement par M. Alvergnat, constructeur à Paris, de la machine que Morren a publiée dans les *Annales de chimie et de physique*, en 1865.

Cette machine, à peu près toute de verre, se compose de deux réservoirs A et B (fig. 149 et 150), reliés entre eux par un tube barométrique T et par un

tube de caoutchouc C. Le réservoir B et le tube T sont fixés à une planchette verticale; le réservoir A, qui est libre et ouvert, s'élève et s'abaisse alternativement avec une course de 1m,12. Ce déplacement se produit au moyen d'un long ruban de fil qui, attaché d'un bout au réservoir A, passe sur une poulie a et de là vient s'enrouler sur une seconde poulie b, qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Au-dessus du réservoir B est un robinet à trois voies n, duquel part un tube d qui sert à l'aspiration, et sur la gauche est un robinet simple m, qui établit la communication avec un réservoir à mercure v et avec l'atmosphère. Le tube d'aspiration d n'est pas directement en communication avec le récipient dans lequel on veut faire le vide; il se rend d'abord à un réservoir o en partie rempli d'acide sulfurique destiné à dessécher les gaz qui arrivent dans l'appareil. C'est ensuite un tube de caoutchouc c qui établit la communication avec le récipient dans lequel on fait le vide. Enfin, sur le réservoir o est un petit manomètre à mercure p.

Ces détails connus, le réservoir A étant au haut de sa course (fig. 149), le robinet m ouvert et le robinet n tourné comme on le voit en Z, le tuyau de caoutchouc, le tube T, le réservoir B et le tube qui est au-dessus sont remplis de mercure jusqu'en v; c'est ce qui a lieu dans la figure 149; fermant alors le robinet m (fig. Y), et abaissant le réservoir A (fig. 150), le mercure descend dans le réservoir B et dans le tube T jusqu'à ce que la différence de niveau des deux côtés égale la hauteur barométrique, et le vide est fait dans le réservoir B. C'est maintenant que, tournant le robinet n, comme le montre la figure X, le gaz du récipient dans lequel on fait le vide arrive par les tubes c et d dans la chambre barométrique B, et le niveau s'abaisse de nouveau dans le tube T. Ramenant enfin les robinets à la position première (fig. Z), et remontant le réservoir A, l'excès de pression du mercure qui est dans le tube de caoutchouc chasse par les robinets n et m le gaz qui avait pénétré dans la chambre B, et si quelques gouttelettes de mercure sont entraînées, elles sont recueillies dans le vase v. On continue ainsi jusqu'à ce que le mercure du manomètre p soit sensiblement de niveau dans les deux branches.

Suivant M. Alvergnat, cette machine fait le vide à $\frac{1}{10}$ de millimètre. Son jeu étant très-lente, on commence par faire le vide à 1 centimètre environ par une machine ordinaire, puis on achève avec la machine à mercure. Pour faire ainsi le vide dans de grands tubes, qui ont jusqu'à 15 litres de capacité, il faut plusieurs heures, en faisant marcher la machine par intermittences de 15 à 20 minutes, surtout en terminant.

187. **Machine de compression.** — Cette machine sert à comprimer de l'air ou tout autre gaz dans un récipient. Elle a beaucoup de rapport avec la machine pneumatique, dont elle ne diffère que par le jeu des soupapes. Comme elle, en effet, elle se compose de deux corps de pompes et d'un récipient (fig. 151). Mais celui-ci, étant à être soulevé par la force élastique du gaz qu'on y comprime, est fortement fixé à la platine. Pour cela, il est formé d'un cylindre de verre ouvert aux deux extrémités, dont les bords sont parfaitement dressés. D'une part, il s'appuie sur la platine, et, de l'autre, il est fermé par une seconde platine percée de quatre trous, dans lesquels passent quatre boulons de fer vissés sur la platine inférieure. Au moyen de ces boulons et d'écrous, on serre les deux platines sur le cylindre. Enfin, pour prévenir les accidents qui pourraient avoir lieu si le cylindre était brisé par la tension du

gaz comprimé, on l'entoure d'un grillage de fil de fer. La tension de l'air dans le récipient se mesure au moyen d'un petit mano-

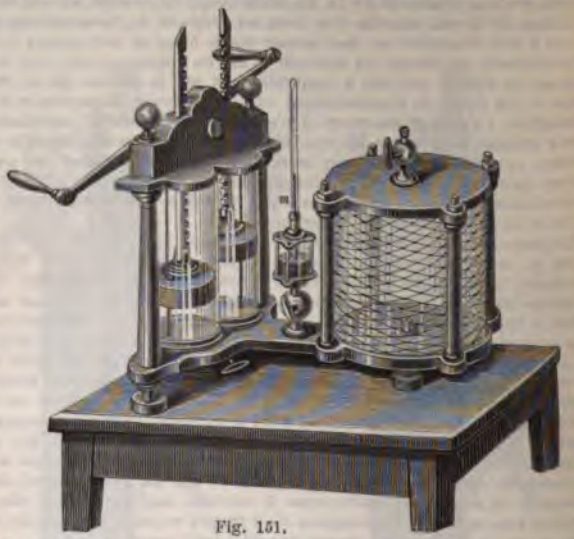
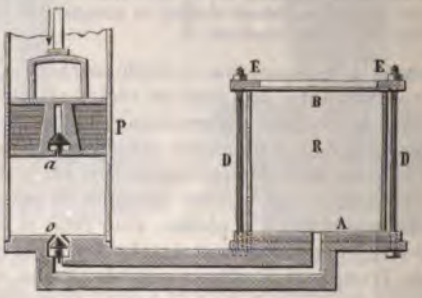


Fig. 151.

mètre à air comprimé, *m*, placé sur le conduit qui unit le corps de pompe au récipient.

Quant au jeu des soupapes, il est représenté dans la figure 152.

Fig. 152.



qui donne une coupe de l'un des corps de pompe et du récipient. Tandis que dans la machine pneumatique elles ouvrent de bas en haut, ici elles ouvrent de haut en bas. Ces soupapes, dont l'une est représentée en *a*, à la base du piston, et l'autre en *o*, à la base du

s de pompe, sont coniques et maintenues fermées par de petits
rts à boudin. Lorsque le piston P monte, l'air se raréfiant en
ous, la soupape *o* reste fermée par le ressort à boudin, et la
ape *a* s'ouvre par l'effet de la pression atmosphérique, ce qui
et à l'air extérieur d'entrer dans le corps de pompe. Lorsque
ston descend, l'air qui est au-dessous se comprime, la sou-
a se ferme, tandis que la soupape *o* s'ouvre et donne passage
r refoulé, qui se rend dans le récipient R. A chaque coup de
n, la même masse d'air, celle que contient le corps de pompe,
tre ainsi dans le récipient, d'où il résulte que le nombre des
s de piston croissant en progression arithmétique, il en est de
e de la masse de l'air,
r suite, de la force élas-
sous le récipient. Tou-
s il y a une limite à la
on que peut prendre le
comprimé. En effet, ne
éviter un espace nui-
entre les soupapes et
du piston, il vient un
nt où l'air qui est dans
orps de pompe n'ac-
plus, même lorsque
'on est au bas de sa
, une force élastique
ure à celle qui a lieu
récipient, et dès lors
sse plus d'air dans
, la soupape *o* ces-
'ouvrir.
chine de compres-
'essus a peu d'ap-
; sous la forme sui-
est, au contraire,
ent usage.

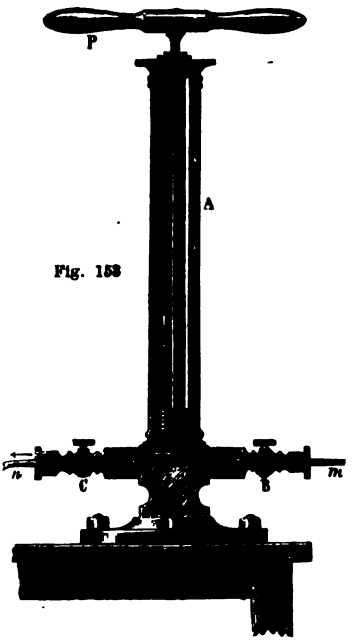


Fig. 153

upe de compres-
pompe de com-
ui est une véritable pompe aspirante et foulante, se
n corps de pompe A d'un petit diamètre (fig. 153),
n fait mouvoir avec la main, au moyen d'une poignée,
in, c'est-à-dire sans soupape. Le corps de pompe est
se, de deux tubulures horizontales à robinet; dans
sont deux soupapes *o* et *s*, agissant en sens con-

traires, pour servir, la première à l'aspiration, la seconde au refoulement. De petits ressorts à boudin appuient sur les soupapes pour les maintenir fermées. Le jeu est entièrement le même que dans la machine de compression.

Dans la pompe de compression, comme dans la machine précédente, la limite de compression dépend du rapport qui existe entre les deux volumes d'air sous le piston, quand il est au haut et au bas de sa course. Si le second volume est, par exemple, $\frac{1}{60}$ du premier, on ne pourra comprimer l'air que jusqu'à soixante atmosphères; car, au delà, la tension dans le récipient serait plus grande que dans le corps de pompe, et alors la soupape *s* ne pourrait s'ouvrir pour donner passage à une nouvelle quantité d'air.

Fig. 155.

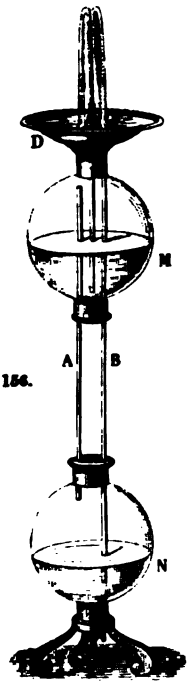
Fig. 154.

La pompe de compression est surtout utilisée pour faire dissoudre l'acide carbonique ou tout autre gaz dans l'eau. Elle se visse alors sur le vase même qui contient le liquide (fig. 155), et la soupape de compression est placée à la base du corps de pompe (fig. 154). Le tube D étant mis en communication avec le réservoir qui contient le gaz qu'on veut faire absorber, la pompe aspire ce gaz et le refoule dans le vase K, où il se dissout en quantité d'autant plus grande, qu'il est plus comprimé (169, 1°). C'est à l'aide d'appareils analogues que sont fabriquées les eaux gazeuses artificielles.

La pompe représentée dans la figure 153 sert aussi à faire le vide. Pour cela, on fait communiquer la tubulure *m* avec le récipient duquel on veut aspirer l'air, et la tubulure *n* avec l'air extérieur. L'appareil prend alors le nom de *pompe à main*.

189. **Fontaine de Héron.** — La *fontaine de Héron* tire son nom de celui de son inventeur, qui vivait à Alexandrie 120 ans avant l'ère chrétienne. Elle se compose d'une cuvette de cuivre D (fig.

t de deux ballons de verre M et N, de 2 à 3 décimètres de tre. La cuvette est en communication avec la partie infé- du ballon N par un long tube de cuivre B. Un second tube



156.

Fig. 157.

communiquer entre eux les deux ballons. Enfin un troi- tube plus petit traverse la cuvette et se rend à la partie in- re du ballon M. Ce troisième tube se retire pour remplir en partie ce même ballon. Puis, replaçant le tube, on de l'eau dans la cuvette. Le liquide descend, par le tube B, le ballon inférieur et en chasse l'air, qui est refoulé dans le supérieur, où l'air comprimé réagit sur l'eau et la fait jail- mme le montre la figure. Sans la résistance de l'air et le ment, le liquide s'élèverait, au-dessus du niveau D, à une ur égale à la différence de niveau dans les deux ballons.

Fontaine intermittente. — La *fontaine intermittente* est e d'un globe de verre C (fig. 157) fermé par un bouchon à

l'émeri, et portant, à sa partie inférieure, deux ou trois tubulures capillaires D par lesquelles se fait l'écoulement. Un tube de cristal, ouvert à ses extrémités, pénètre par l'une dans le globe C, et par l'autre vient se terminer près d'un orifice central pratiqué dans une cuvette de cuivre B qui porte tout l'appareil.

Le globe C étant rempli d'eau aux deux tiers environ, le liquide s'écoule d'abord par les orifices D, comme le montre la figure, la pression intérieure, en D, étant égale à celle de l'atmosphère qui se transmet par la partie inférieure du tube de cristal, plus au poids de la colonne d'eau CD, tandis qu'extérieurement, au même point, la pression est seulement celle de l'atmosphère. Ces conditions persistent tant que l'orifice inférieur du tube est ouvert, c'est-à-dire tant que la tension de l'air, à l'intérieur, est égale à la pression de l'atmosphère, car l'air entre à mesure que l'eau s'écoule; mais l'appareil étant réglé de manière que l'orifice pratiqué au fond de la cuvette B laisse écouler moins d'eau que n'en donnent les tubulures D, le niveau s'élève peu à peu dans la cuvette, et le tube finit par plonger entièrement dans le liquide. L'air extérieur ne pouvant plus alors pénétrer dans le globe C, l'air s'y raréfie à mesure que l'écoulement continue, et il vient un moment où la pression due à la colonne d'eau CD et à la tension de l'air renfermé dans l'appareil est égale à la pression extérieure qui s'exerce en D. Par suite, l'écoulement s'arrête; mais la cuvette continuant à se vider, le bout inférieur du tube se trouve bientôt dégagé. L'air entre alors, l'écoulement recommence, et ainsi de suite tant qu'il reste de l'eau dans le globe C.

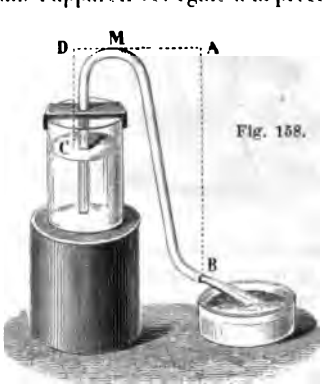


Fig. 158.

* 191. **Siphon.** — Le *siphon* est un tube recourbé, à branches inégales, qui sert à transvaser les liquides par-dessus les bords des vases; c'est la branche la plus courte qui plonge dans le liquide à transvaser (fig. 158).

Pour se servir du siphon, on commence par l'*amorcer*, c'est-à-dire par le remplir de liquide. Pour cela, on le retourne, et on l'emplit directement; puis, fermant momentanément ses deux orifices, on le remet en place comme le montre la figure; ou bien, plongeant la petite branche dans le liquide, on aspire avec la

bouche, par l'orifice B, l'air qui est dans l'appareil. Le vide se faisant alors dans celui-ci, le liquide du vase C est refoulé dans le tube par l'effet de la pression atmosphérique et le remplit.

Lorsque le liquide à transvaser n'est pas de nature à être introduit dans la bouche, on fait usage d'un siphon auquel est soudé un second tube M (fig. 159) parallèle à la grande branche. C'est alors par l'orifice O de ce tube additionnel qu'on aspire l'air, en ayant soin de fermer en même temps l'orifice P, et de ne pas laisser le liquide s'élever, dans le tube additionnel, jusqu'à la bouche. Ou bien, on soude à la grande branche un tube terminé par un petit ballon de verre (fig. 161). En chauffant doucement celui-ci, l'air s'y dilate et s'échappe en assez grande quantité pour que le siphon s'amorce ensuite de lui-même par le refroidissement. Par quelque procédé que le siphon ait été amorcé, l'écoulement se continue de la petite branche vers la grande, tant que la première plonge dans le liquide.

Pour concevoir comment cet écoulement a lieu, il faut remarquer que la force qui presse le liquide en C (fig. 158) et le sollicite à s'écouler dans la direction CMB, égale la pression atmosphéri-

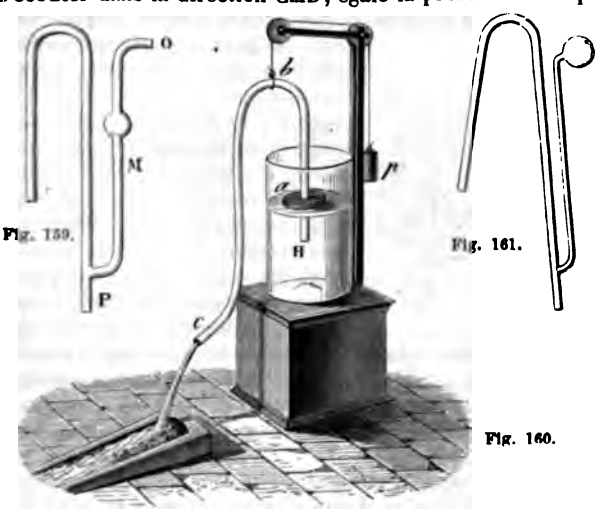


Fig. 159.

Fig. 161.

Fig. 160.

que, moins le poids d'une colonne d'eau dont la hauteur est DC. De même, en B, la force qui sollicite le liquide dans la direction BMC est le poids de l'atmosphère, moins celui d'une colonne d'eau ayant pour hauteur AB. Or cette dernière colonne étant plus grande que

DC, il en résulte que la force effective qui agit en B est plus petite que celle qui agit en C. L'écoulement a donc lieu en vertu de la différence de ces deux forces. Par suite, la vitesse d'écoulement est d'autant plus grande, que la différence de niveau entre l'orifice B et la surface du liquide dans le vase C est plus grande.

On conclut de la théorie du siphon qu'il ne fonctionnerait pas dans le vide, ou encore si la hauteur CD était plus grande que la colonne liquide qui fait équilibre à la pression atmosphérique.

192. **Siphon à écoulement constant.** — D'après ce qui précède, pour que l'écoulement soit constant dans le siphon, il faut que la différence entre les hauteurs du liquide, dans les deux branches, soit toujours la même. On obtient ce résultat en disposant l'appareil comme le montre la figure 160. Le siphon est maintenu en équilibre par un flotteur *a* et par un poids *p*, de manière qu'à mesure que le niveau baisse dans le vase H, le siphon descende avec lui; la différence entre les hauteurs *ab* et *bc* demeure donc invariable.

193. **Siphon intermittent, ou vase de Tantale.** — Le *siphon intermittent*, ainsi que son nom l'indique, est celui dans lequel l'écoulement n'est pas continu. Ce siphon est disposé dans un vase de manière que la branche la plus courte s'ouvre près du fond, tandis que la plus grande le traverse et s'ouvre au dehors (fig. 162). Le vase étant alimenté par une source d'eau constante, le niveau s'y élève peu à peu, et en même temps dans la petite branche, jusqu'au sommet du siphon. Celui-ci s'amorce alors par l'effet de la pression du liquide, et l'écoulement s'opère comme le montre la figure ci-contre. Or, comme on a soin que l'écoulement du siphon soit plus rapide que celui du tube qui alimente le vase, le niveau baisse dans celui-ci, et la petite branche cesse bientôt de plonger; le siphon se vide alors, et l'écoulement est interrompu. Mais le vase continuant à être alimenté par la source constante, le niveau s'élève de nouveau, et la même série de phénomènes se renouvelle périodiquement.

Fig. 162.

Le siphon intermittent donne l'explication des fontaines intermittentes naturelles qu'on observe dans plusieurs contrées. Il est de ces fontaines qui donnent de l'eau pendant plusieurs jours ou plusieurs mois, puis s'arrêtent pendant un intervalle plus ou moins long, et recommencent ensuite à couler; d'autres s'arrêtent et reprennent leur écoulement plusieurs fois dans une heure.

phénomènes en admettant des cavités souter-
lissent plus ou moins lentement d'eau par des
vident ensuite par des fissures disposées dans
aire siphon intermittent.

espèces de pompes.— Les pompes sont des ma-
t à élever l'eau par aspiration, par pression ou
combinés; de là leur division en *pompe aspi-
lante* et *pompe aspirante et foulante.* Avant
nait l'ascension de l'eau dans les pompes aspi-
de la nature pour le vide; on va voir que ce
à un effet de la pression atmosphérique.

pièces qui entrent dans la composition d'une
rps de pompe, le *piston*, les *soupapes* et les
on et *d'ascension.* Le corps de pompe est un
ixe, de métal ou de bois, dans lequel est le pis-
n cylindre de métal ou de bois garni d'étoupes,
ent doux dans toute la longueur du corps de
pes sont des disques de métal ou de cuir, ser-
nativement les orifices qui font communiquer
e avec les tuyaux d'aspiration ou d'ascension.
t des tuyaux dans lesquels l'eau est d'abord as-
s de pompe, puis refoulée au-dessus.

Fig. 164.

usieurs sortes de soupapes : les plus fréquem-
nt la *soupape à clapet* (fig. 163) et la *soupape*
. La première est un disque métallique fixé à
rd de l'orifice qu'il doit fermer. Pour que la fer-
omplète, la face inférieure du disque est garnie

pe conique, elle consiste en un cône métallique
ne ouverture de même forme. Au-dessous de
ide de fer, dans laquelle passe un boulon à tête
Cette disposition limite le jeu de la soupape,
levée par l'eau, et l'empêche de chavirer.

ante. — Représentée en coupe dans la figure
e compose : 1° d'un corps de pompe cylindrique,
upérieure une tubulure latérale par laquelle l'eau

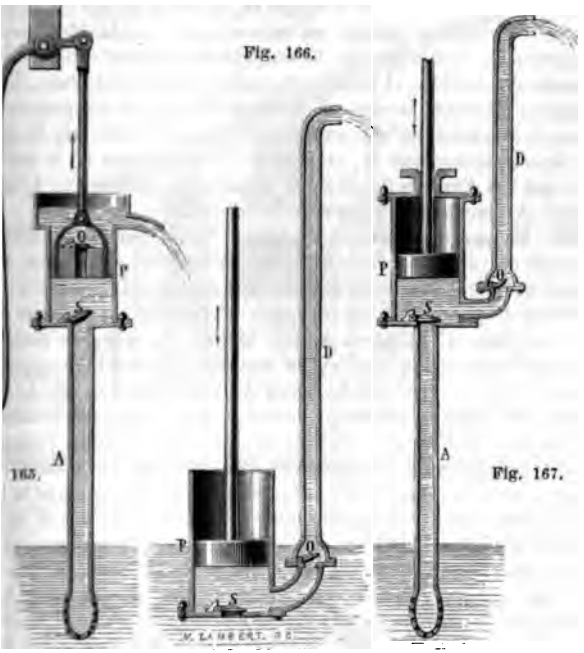
s'écoule, et percé à sa base d'un trou recouvert d'une so
clapet S, ouvrant de bas en haut; 2° d'un tube d'aspiratio
d'un bout au corps de pompe, et plongeant de l'autre d
quide qu'on veut élever; 3° d'un piston P, qui porte une
quelle on imprime un mouvement de va-et-vient à l'ai
brimbale B. A son centre, le piston est percé d'un trou que
et que ferme une soupape à clapet O, ouvrant de bas en h

Lorsque le piston, d'abord au bas de sa course, s'élève
tend à se faire au-dessous, et la soupape O reste ferm
pression atmosphérique, tandis que l'air du tuyau A, en
son élasticité, soulève la soupape S, et passe en partie
corps de pompe. L'air étant ainsi raréfié, l'eau monte
tuyau jusqu'à ce que la pression de la colonne liquide s
ajoutée à la tension de l'air qui reste dans le tuyau, fasse
à la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau à l'e

Lorsque le piston descend, la soupape S se ferme par so
poids, et s'oppose au retour de l'air du corps de pomp
tube d'aspiration. L'air comprimé par le piston fait alors
soupape O, et se dégage dans l'atmosphère par le trou rés
le piston. A un deuxième coup de celui-ci, la même séri
nomènes se reproduit, et après quelques coups, l'eau pén
dans le corps de pompe. A partir de ce moment, l'effet p
modifié : pendant la descente du piston, la soupape S se fer
comprimée soulève la soupape O et pénètre au-dessus d
qui la soulève ensuite, lorsqu'il remonte, jusqu'à la tubul
rale par laquelle l'eau se déverse. Alors il n'y a plus d'ai
le corps de pompe, ni dans le tube d'aspiration; et l'eau,
par la pression atmosphérique, suit le piston dans sa co
condition, toutefois, qu'il ne s'élève pas à plus de 10m,3
sus du niveau de l'eau dans le réservoir où plonge le tu
piration A. En effet, on a vu (144) que le poids d'une
d'eau de 10m,33 fait équilibre à la pression atmosphériq

Pour connaître la hauteur qu'on peut donner au tube
tion A, il faut observer que, dans la pratique, le piston ne s'
jamais exactement sur la base du corps de pompe, et que
est au plus bas de sa course, il existe encore au-dessous
espace nuisible rempli d'air à la pression atmosphérique.
espace nuisible égal à $\frac{1}{30}$ du volume du corps de pompe:
est dans l'espace nuisible se dilate à mesure que le piston
et lorsque celui-ci est arrivé au haut de sa course, la te
l'air qui reste dans le corps de pompe est $\frac{1}{30}$ de la pressi
sphérique, d'après la loi de Mariotte. L'air du tuyau d'aspi
peut donc être raréfié au delà de cette limite, et, par sui

be, l'eau ne peut s'élever, dans le cas que nous considérons, une hauteur égale aux $\frac{22}{30}$ de $10^m,33$, c'est-à-dire à $9^m,98$. hauteur est encore trop grande, puisque l'eau doit s'élever certaine quantité au-dessus de la soupape S. Aussi, en gé-, le tube d'aspiration n'a-t-il pas plus de 8 mètres.



ns la pompe aspirante, l'eau est donc élevée d'abord dans le d'aspiration par l'effet de la pression atmosphérique, et la eur ainsi obtenue ne saurait dépasser 8 à 9 mètres. Mais une que l'eau a passé au-dessus du piston, c'est la force ascen-elle de celui-ci qui l'élève, et la hauteur qu'elle peut alors adre ne dépend que de la force qui fait mouvoir le piston et hauteur du tuyau d'ascension qu'on place au-dessus du corps mpe. Lorsque la pompe est disposée pour fonctionner ainsi, ui donne le nom de *pompe élévatoire*.

6. **Pompe foulante.** — La pompe foulante n'utilise pas la sion atmosphérique, et n'agit, comme son nom l'indique, que

par pression. Représentée en coupe dans la figure 166, elle diffère de la précédente en ce que son piston est plein, et qu'elle n'a pas de tuyau d'aspiration, le corps de pompe étant plongé dans l'eau même qu'on veut élever; enfin, sur le côté du corps de pompe est adapté un tuyau D, qui est le tuyau d'ascension. A la partie inférieure de ce tuyau est une soupape O, ouvrant de bas en haut, et à la base du corps de pompe est une soupape semblable S.

Lorsque le piston monte, la soupape S s'ouvre, soulevée par la poussée du liquide, et le corps de pompe se remplit. Puis, lorsque le piston descend, la soupape S étant fermée par son propre poids et par la pression qu'elle supporte, l'eau, refoulée par le piston, fait ouvrir la soupape O, et s'élève dans le tuyau D, à une hauteur qui n'a d'autres limites que la pression exercée par le piston, et que la résistance de l'appareil.

197. **Pompe aspirante et foulante.** — La pompe aspirante et foulante élève l'eau à la fois par aspiration et par pression. Représentée en coupe dans la figure 167, son piston est plein, et à la base du corps de pompe est une soupape ouvrant de bas en haut et fermant un tube d'aspiration A. Sur le côté du corps de pompe est un tube d'ascension D avec sa soupape. Quand la pompe fonctionne, l'eau aspirée par le tuyau A, toutes les fois que le piston monte, est ensuite refoulée, lorsqu'il descend, dans le tuyau D. Quant aux limites d'aspiration et d'ascension, elles restent les mêmes que dans les deux pompes qui viennent d'être décrites.

Dans la pompe aspirante et foulante, représentée dans la figure 167, l'écoulement est évidemment intermittent, n'ayant lieu que lorsque le piston s'abaisse, et s'arrêtant quand il remonte. On corrige ce défaut au moyen du *réservoir d'air* (198).

198. **Pompe à incendie.** — La pompe à incendie est une pompe foulante dans laquelle la régularité du jet s'obtient non-seulement à l'aide d'un réservoir d'air décrit ci-après, mais encore au moyen de deux pompes foulantes agissant alternativement (fig. 168). Les deux pompes *m*, *n*, mues par un même balancier PQ auquel sont appliqués huit hommes, plongent dans une caisse MN, qu'on nomme *bâche*, et qu'on maintient pleine d'eau tout le temps que l'appareil fonctionne. D'après la disposition des soupapes, on voit que lorsqu'une des pompes aspire l'eau de la bâche, l'autre la refoule dans un compartiment R qu'on nomme le *réservoir d'air;* de là, par un orifice Z, l'eau passe dans un long tuyau de cuir qu'on dirige sur le lieu incendié.

Sans l'addition du réservoir d'air, l'eau cessant d'être refoulée toutes les fois que les pistons arrivent au haut et au bas de leur course, l'écoulement serait intermittent. Or cet inconvénient disparaît avec le réservoir d'air. En effet, la vitesse de l'eau à son entrée dans ce réservoir étant plus grande qu'à sa sortie, son niveau s'élève au-dessus de l'orifice Z, en comprimant l'air qui remplit le réservoir. Par suite, toutes les fois que les pistons s'arrêtent, l'air ainsi comprimé, réagissant sur le liquide, le force à s'écouler pendant l'instant très-court de l'arrêt des pistons; d'où l'on voit que l'effet du réservoir d'air, dans les pompes foulantes, est de rendre l'écoulement continu.

harge que supporte le piston. — Dans la pompe aspirante (fig. 165), que l'eau remplit le tuyau d'aspiration et le corps de pompe jusqu'à l'écoulement, *l'effort nécessaire pour soulever le piston égale le poids lonne d'eau qui aurait pour base le piston et pour hauteur la distance de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le réservoir où l'on puise,*

tire la hauteur à laquelle l'eau est
n effet, soient H la pression atmo-
, h la hauteur de l'eau au-dessus
, et h' la hauteur de la colonne
remplit le tube d'aspiration A et

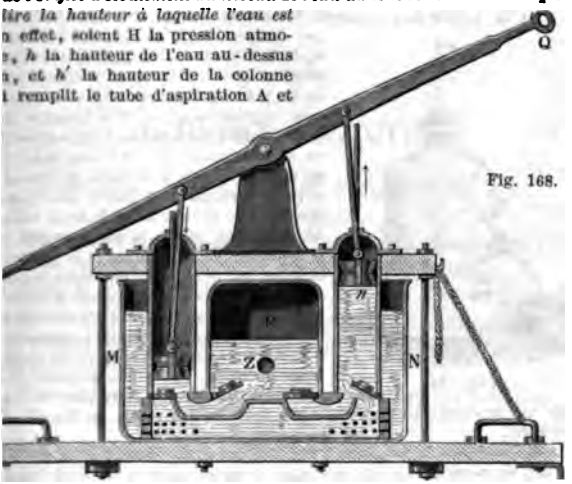


Fig. 168.

inférieure du corps de pompe. La pression au-dessus du piston est évi-
t $H+h$, et celle au-dessous $H-h'$, puisque le poids de la colonne h'
tire équilibre à la pression atmosphérique. Or la pression $H-h'$ tendant à
le piston, la résistance effective est égale à l'excès de $H+h$ sur $H-h'$,
ire à $h+h'$.

la pompe aspirante et foulante (fig. 167), la pression que supporte le
t aussi égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la sec-
piston, et pour hauteur celle à laquelle l'eau est élevée.

Flacon de Mariotte, son usage. — Le *flacon de Mariotte* est un ap-
ui offre plusieurs effets remarquables de pression atmosphérique, et au
luquel on obtient un écoulement constant. C'est un flacon un peu grand
goulot est fermé d'un bouchon (fig. 169). Dans celui-ci passe un tube
ouvert à ses deux bouts. Sur le côté du flacon sont trois tubulures a,
acune à orifice étroit, et fermées par un petit tampon de bois.

con et le tube étant entièrement remplis d'eau, considérons ce qui se
rqu'on ouvre successivement une des tubulures a, b, c, en supposant,
s montre la figure, que l'extrémité inférieure du tube g s'arrête entre
lures b et c.

l'on ouvre d'abord la tubulure b, il y a écoulement, le niveau baisse
tube g, et aussitôt que ce niveau y est le même qu'en b, l'écoulement
Ces phénomènes s'expliquent par l'excès de pression qui avait d'abord
, de dedans en dehors, excès de pression qui disparaît lorsque le niveau
ème dans le tube g qu'en b. En effet, avant que l'écoulement com-

mençât, la pression sur tous les points de la tranche horizontale i
la même. En *e*, elle se composait de la pression atmosphérique,
de la colonne d'eau *pe*, tandis qu'en *b* la pression est seulement
de l'atmosphère. Mais une fois que le niveau est le même en *e* e
équilibre, parce que dans le flacon et dans le tube la pression est
sur tous les points de la tranche horizontale *be* (82, 3°). En effe

Fig. 169.

qui s'exerce, dans ce cas, en *b* e
égale à celle de l'atmosphère, il e
montrer que c'est la même pressio
en un point quelconque *o* de la tra
cela, représentons par H la press
sphère; cette force agissant directe
en *e*, se transmet en tous sens d
du flacon, d'après le principe de P
la paroi *k* supporte de bas en haut
égale à H — *ko;* car le poids de la
ko détruit en partie la pression
transmettre en *k*. Or, d'après le p
canique que la *réaction est toujour*
traire à l'action, la pression H-
voyée de haut en bas par la paroi *k*
be; en sorte que la molécule *o* supp
lité, deux pressions, l'une égale au
lonne d'eau *ko*, l'autre à la pressio
sultant de la réaction de la paroi
réelle que supporte la molécule *o* est donc *ko* + H — *ko*, ou H,
démontrer.

2° Si l'on ferme la tubulure *b* et qu'on ouvre la tubulure *a*, il n
lement; au contraire, l'air entre dans le flacon par l'orifice *a*, et
dans le tube *g* jusqu'à la tranche *ad;* à ce moment l'équilibre e
effet, par un raisonnement semblable au précédent, on reconnaît
sion est alors la même sur tous les points de la tranche horiz

3° Les orifices *a* et *b* étant fermés, on ouvre l'orifice *c*. Dans
écoulement avec une vitesse constante, tant que le niveau de l
flacon, n'est pas descendu au-dessous de l'orifice *l* du tube; l'air em
à bulle par cet orifice et gagne la partie supérieure du flacon.

Pour démontrer que l'écoulement est constant par l'orifice *c*, il
que la pression qui s'exerce sur la tranche horizontale *ch* est i
égale à la pression de l'atmosphère augmentée de celle de la colo
Supposons, en effet, que, dans le flacon, le niveau de l'eau se so
qu'à la tranche *ad*. L'air qui a pénétré dans le flacon supporte alor
égale à H — *pm*. En vertu de son élasticité, l'air renvoie cette press
ch. Or celle-ci supporte en outre le poids de la colonne d'eau
pression transmise en *m* est en réalité *pm* + H — *pn*, ou H + *m*
H + *hl*. On démontrerait de la même manière que cette pression
même lorsque le niveau s'est abaissé en *be*, et ainsi de suite tant
est plus haut que l'orifice *l;* la pression sur la tranche *ch* est do
et, par conséquent, la vitesse d'écoulement. Mais une fois que le n
cendu au-dessous du point *l*, cette pression décroît, et, par suite,

D'après ce qui précède, le flacon de Mariotte donne le moyen
écoulement constant; pour cela, on le remplit d'eau et l'on tient ou
lure placée au-dessous de l'orifice *l* du tube. La vitesse d'écoulen
constante et proportionnelle à la racine carrée de la hauteur *lh*.

LIVRE V

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION, PROPAGATION ET RÉFLEXION DU SON

. **Objet de l'acoustique.**— L'*acoustique* a pour objet l'étude
ons et celle des vibrations des corps élastiques.
musique considère les sons par rapport aux sentiments et
assions qu'ils peuvent exciter en nous; l'acoustique ne traite
es propriétés des sons, abstraction faite des sensations que
en éprouvons.
. **Son et bruit.**— Le *son* est une sensation excitée dans l'or-
de l'ouïe par le mouvement vibratoire des corps, lorsque ce
ement se transmet à l'oreille à l'aide d'un milieu élastique.
is les sons ne sont point identiques : ils présentent des diffé-
s assez sensibles pour qu'on puisse les distinguer entre eux,
mparer et déterminer leurs rapports.
distingue le son d'avec le *bruit*. Le son proprement dit, ou
usical, est celui qui produit une sensation continue et dont
ut apprécier la valeur musicale; tandis que le bruit est un
l'une durée trop courte pour être bien apprécié, comme le
du canon; ou bien c'est un mélange confus de plusieurs
discordants, comme le roulement du tonnerre, le bruit des
es. Toutefois la différence entre le son et le bruit n'est pas
ment tranchée; il est, dit-on, des oreilles assez bien orga-
s pour déterminer la valeur musicale du bruit produit par
voiture roulant sur le pavé.
3. **Cause du son.**— Le son est le résultat d'oscillations ra-
s imprimées aux molécules des corps élastiques, lorsque, par
oc ou le frottement, l'état d'équilibre de ces molécules a été
blé. Elles tendent alors à reprendre leur position première;
s elles n'y reviennent qu'en exécutant, en deçà et au delà de
e position, des mouvements vibratoires extrêmement rapides,
t l'amplitude décroît très-vite.
n nomme *corps sonore* celui qui rend ou peut rendre un son,
ibration simple, le mouvement qui *ne comprend* qu

ou qu'un *retour* des molécules vibrantes; une *vibration* ou *complète* comprend l'*allée* et le *retour*. Les vibratior faciles à constater par les expériences suivantes. Qu'on p une poussière lég un corps qui rend elle prend un mou rapide, et rend ai sibles les vibrati corps; de même, pince une corde un peu longue, ses

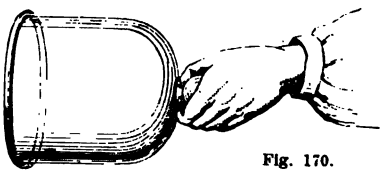


Fig. 170.

tions sont apparentes à l'œil. Ou encore on prend une clc verre qu'on tient horizontalement d'une main par le bout 170), et de l'autre on donne sur la cloche un coup sec avec l pour la faire vibrer. Or, si l'on a placé au dedans un fragr métal ou de tout autre corps dur, le petit corps est soulev dement par les vibrations de la paroi, sur laquelle il fait er des chocs répétés; mais si l'on pose la main sur la cloche, ce qui arrête les vibrations, les chocs cessent aussitôt.

Fig. 171.

204. **Le son ne se propage pas dans le vide.** — Les vibrations des corps élastiques ne peuvent faire naître en nous la sensation du son que par l'intermédiaire d'un milieu pondérable, interposé entre l'oreille et le corps sonore, et vibrant avec lui. Ce milieu est ordinairement l'air; mais les gaz, les vapeurs, les liquides, les solides, transmettent aussi le son.

Pour démontrer qu'un milieu pondérable est nécessaire à la propagation du son, on place sous la cloche d'une machine pneumatique un timbre métallique que frappe un petit marteau mû par un mouvement d'horlogerie (fig. Tant que la cloche est pleine d'air à la pression ordinai entend résonner le timbre; mais à mesure qu'on raréfie l' son perd de son intensité, et il cesse d'être perceptible lc le vide est fait. Donc le son ne se propage pas dans le vide

Pour que l'expérience réussisse bien, il faut disposer la s

rie sur de la ouate; autrement les pièces métalliques dont cette sonnerie est formée transmettent leurs vibrations à la platine de la machine pneumatique, et celle-ci à l'air.

On peut faire la même expérience d'une manière plus simple, à l'aide d'un ballon de verre à robinet, contenant une petite sonnette suspendue à un fil. Si l'on agite le ballon lorsqu'il est plein d'air, on entend distinctement la sonnette; mais après qu'on a raréfié l'air qu'il renferme, au moyen de la machine pneumatique, on n'entend plus rien.

205. Le son se propage dans tous les corps élastiques. — Si, dans les expériences ci-dessus, après avoir fait le vide, on laisse entrer, dans le récipient ou dans le ballon, un gaz ou une vapeur, on entend le son du timbre ou de la sonnette, ce qui démontre que le son se propage dans les gaz et dans les vapeurs comme dans l'air. Toutefois, d'après les expériences de M. John Leslie, le son se transmet très-mal dans l'hydrogène, ou dans un mélange de ce gaz et d'air; et le son s'éteint même davantage dans ce mélange que dans l'hydrogène pur.

Le son se propage bien dans les liquides. Lorsque deux corps se heurtent sous l'eau, on en entend distinctement le choc, et un plongeur, au fond de l'eau, distingue ce qu'on dit sur le rivage.

Quant aux solides, leur conductibilité est telle, qu'un bruit extrêmement léger, comme celui du frottement d'une barbe de plume à l'extrémité d'une pièce de bois, est perçu à l'autre extrémité. Le sol conduit si bien le son, que, la nuit, en appliquant l'oreille contre terre, on peut entendre, à de grandes distances, des pas de chevaux ou tout autre bruit.

206. Mode de propagation du son dans l'air. — Pour simplifier la théorie de la propagation du son, soit d'abord le cas où il se propage dans un tube indéfini MN (fig. 172), rempli d'air à une pression et à une température constantes, et, dans ce tube, soit un piston P oscillant avec une grande vitesse de A en *a*, et réciproquement. Lorsqu'il passe de A en *a*, ce piston comprime la couche d'air en contact avec lui; or, par suite de la rapidité du mouvement et de la grande compressibilité de l'air, la condensation ne s'opère pas dans toute la longueur du tube, mais seulement sur une certaine longueur *a*H, qu'on nomme l'*onde condensée*.

Toutes les parties de l'onde condensée ne le sont pas également, et leur vitesse n'est pas la même; car le piston, dans son mouvement de va-et-vient, est animé de vitesses variables. Sa vitesse, d'abord nulle en A, croît progressivement jusqu'au milieu de sa course, puis décroît jusqu'en *a*, où elle est nulle de nouveau. De là, dans l'onde *a*H, des densités et des vitesses à

riables avec la vitesse du piston. En *a*, où celui-ci est au repos, la vitesse de l'air est nulle, et ce fluide a repris sa densité primitive. En H, où finit l'onde, la vitesse et la densité sont les mêmes qu'en *a*; mais, dans les points intermédiaires, ces quantités croissent depuis le point *a* jusqu'à la section moyenne de l'onde, pour décroître ensuite jusqu'en H.

En concevant le tuyau MN divisé en longueurs égales à *a*H, et

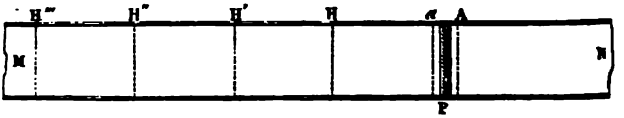


Fig. 172.

chacune partagée en tranches parallèles au piston, on démontre, par le calcul, qu'au moment où la première tranche de l'onde *a*H arrive au repos, la première tranche de la partie HH' commence à participer au mouvement; puis, lorsque la seconde tranche de l'onde *a*H passe à l'état de repos, le mouvement se communique à la deuxième tranche de HH', et ainsi de suite, de tranche en tranche, dans les parties H'H'', H''H'''... L'onde condensée avance donc dans le tube, chacune de ses parties passant successivement par les mêmes degrés de vitesse et de condensation.

Le piston revenant ensuite sur lui-même dans la direction *a*A, il se produit derrière lui un vide dans lequel se dilate la couche d'air en contact avec sa face postérieure. Puis la couche suivante, se dilatant à son tour, ramène la première à son état primitif de condensation, et ainsi de suite, de tranche en tranche; de sorte que, lorsque le piston est revenu en A, il s'est produit une *onde dilatée* de même longueur que l'onde condensée, et la suivant immédiatement dans le tube cylindrique, où elles se propagent ensemble, les tranches correspondantes des deux ondes possédant des vitesses égales et contraires.

L'ensemble de l'onde condensée et de l'onde raréfiée forme une *onde sonore;* c'est-à-dire qu'une onde sonore comprend la partie de la colonne d'air modifiée pendant une allée et un retour du piston; la *longueur* de l'onde sonore est l'épaisseur de l'onde condensée et de l'onde dilatée réunies, c'est-à-dire l'espace que le son parcourt pendant la durée d'une vibration complète du corps qui le produit. Cette longueur est d'autant moindre, que les vibrations sont plus rapides.

On passe facilement de la théorie du mouvement des ondes sonores dans un tube, à celle de leur mouvement dans un milieu indéfini dans tous les sens; il suffit, pour cela, d'appliquer dans

ections, à chaque molécule des corps vibrants, ce qui it d'un piston mobile dans un tuyau. Il se produit, en de chaque centre d'ébranlement, une suite d'ondes lternativement condensées et raréfiées. Ces ondes ses entre deux surfaces sphériques concentriques ns croissent graduellement, tandis que la longueur reste la même, leur masse augmente à mesure ignent du centre d'ébranlement; il en résulte que la ration imprimée aux molécules s'affaiblit graduelle- l'intensité du son diminue.

ondes sphériques alternativement condensées et ra- en se propageant dans l'air, transmettent le son. Si nts sont ébranlés en même temps, il se produit au- un un système d'ondes semblable au précédent. Or des se transmettent les unes à travers les autres, sans eur longueur ni leur vitesse. Tantôt les ondes conden- ées se superposent avec des ondes de même nature, produire un effet égal à leur somme; tantôt elles at et produisent un effet égal à leur différence. Il ler en plusieurs points la surface d'une eau tran- endre visible la *coexistence des ondes*.

s qui font varier l'intensité du son. — Ces causes sont : n corps sonore, l'amplitude des vibrations, la densité le lieu où le son se produit, la direction des courants n le voisinage d'autres corps sonores.

ité du son est en raison inverse du carré de la dis- ps sonore. Cette loi, à laquelle on est conduit par la t aussi se démontrer expérimentalement. Concevons, sieurs sons exactement d'égale intensité, produits, par des timbres identiques frappés par des mar- me poids, tombant de hauteurs égales. Si l'on place s timbres à une distance de 20 mètres de l'oreille, et e distance de 10 mètres, on observe que ce dernier, rend un son de même intensité que les quatre pre- s frappés simultanément; ce qui fait voir que, pour double, l'intensité est quatre fois moindre.

sité du son augmente avec l'amplitude des vibra- ps sonore. La liaison qui existe entre l'intensité du litude des vibrations se constate facilement à l'aide ibrantes; en effet, si les cordes sont un peu longues, ns sont sensibles à l'œil, et l'on vérifie que, l'ampli- llations décroissant, le son s'affaiblit.

ité du son dépend de la densité de l'air d

où il se produit. Lorsqu'on place sous le récipient de la machine pneumatique une sonnerie mue par un mouvement d'horlogerie, l'intensité du son décroît à mesure qu'on raréfie l'air.

Dans l'hydrogène, qui est environ 14 fois moins dense que l'air, les sons ont une intensité beaucoup plus faible, quoique la pression soit la même. Dans l'acide carbonique, au contraire, dont la densité, par rapport à l'air, est de 1,529, les sons deviennent plus intenses. Sur les hautes montagnes, où l'air est très-raréfié, il faut parler avec effort pour se faire entendre, et l'explosion d'une arme à feu n'y produit qu'un son faible.

4° *L'intensité du son est modifiée par l'agitation de l'air et la direction des vents.* On constate que, par un temps calme, le son se propage toujours mieux que lorsqu'il fait du vent, et qu'en ce dernier cas le son est plus intense, à distance égale, dans la direction du vent que dans la direction contraire.

5° *Le son est renforcé par le voisinage d'un corps sonore.* Une corde d'instrument, tendue à l'air libre, ne rend qu'un son faible loin de tout corps sonore; mais qu'elle soit tendue au-dessus d'une caisse sonore, comme dans la guitare, le violon ou la basse, elle rend un son plein et intense; ce qui est dû à ce que la caisse et l'air qu'elle contient vibrent à l'unisson avec la corde. De là l'emploi des caisses sonores dans les instruments à cordes.

208. **Influence des tuyaux sur l'intensité du son.** — La loi que l'intensité du son est en raison inverse du carré de la distance, n'est pas applicable aux sons transmis par des tuyaux, surtout si ceux-ci sont cylindriques et droits. Les ondes sonores ne se propageant plus alors sous la forme de sphères concentriques croissantes, le son peut être porté à une distance considérable sans altération bien sensible. Biot a constaté que, dans un tuyau de conduite des eaux de Paris, long de 951 mètres, la voix perd si peu de son intensité, que, d'une extrémité à l'autre de ce tube, on peut entretenir une conversation à voix basse. Toutefois l'affaiblissement du son devient sensible dans les tubes d'un grand diamètre, ou dont les parois présentent des anfractuosités. C'est ce qu'on observe dans les souterrains et dans les longues galeries.

Cette propriété qu'ont les tubes de porter au loin les sons est utilisée pour transmettre les ordres dans les hôtels et dans les grands établissements au moyen de tubes de caoutchouc, d'un petit diamètre, passant d'une pièce à l'autre au travers des murs. Si l'on parle d'une voix peu élevée à l'une des extrémités, on est entendu très-distinctement à l'autre.

209. **Vitesse du son dans les gaz.** — La propagation des ondes sonores étant successive, le son ne peut se transmettre d'un lieu

utre que dans un intervalle de temps plus ou moins long.
e que démontrent un grand nombre de phénomènes. Par
le, le bruit de la foudre ne se fait entendre qu'un certain
après qu'on a vu l'éclair, bien que le bruit et l'éclair se
sent simultanément dans la nue.

ombreuses tentatives ont été faites pour déterminer la vi-
u son dans l'air, c'est-à-dire l'espace qu'il parcourt en une
e. La dernière fut faite dans l'été de 1822, pendant la nuit,
s membres du Bureau des longitudes. On avait choisi pour
s deux hauteurs situées, l'une à Villejuif, l'autre à Mont-
près de Paris. A chaque station, on tirait, de dix en dix
s, un coup de canon. Les observateurs de Villejuif enten-
très-distinctement les douze coups tirés à Montlhéry; mais
e cette station n'entendirent que sept coups, sur douze tirés
juif, la direction du vent étant contraire.

aque station, on notait, au moyen de chronomètres, le
qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière, au moment
plosion, et l'audition du son. Ce temps pouvait être pris pour
u'employait le son à se propager d'une station à l'autre,
tervalle des deux stations n'était que de 18 612^{m},52, et l'on
en optique, que, pour parcourir cette distance, il faut à la
e un temps inappréciable. On constata ainsi que la durée
ne de propagation entre les deux stations était de 54^{s},6.
nt par ce nombre l'intervalle des deux stations, on trouve
vitesse du son, par seconde, est de 340^{m},89, à la tempéra-
16 degrés, qui était celle de l'air pendant l'expérience.

itesse du son dans l'air décroît avec la température : à 10
, elle n'est que de 337 mètres; à zéro, de 333 mètres. Mais,
ne même température, elle est indépendante de la densité de
t, par conséquent, de la pression. A température égale, elle
même pour tous les sons, forts ou faibles, graves ou aigus.
t, Biot constata, dans les expériences ci-dessus mention-
ur la conductibilité des tuyaux, que lorsqu'on jouait de la
l'extrémité d'un tuyau de fonte de 951 mètres de longueur,
s gardaient leur rhythme à l'autre extrémité; ce qui indique
s différents sons se propagent avec des vitesses égales. Ce-
nt ceci ne doit pas être admis d'une manière générale pour
ns qui ont une origine dissemblable, comme le bruit du
, par exemple, et le son d'un instrument ou de la voix hu-
. C'est du moins ce que tend à prouver l'observation sui-
, faite par le capitaine Parry, pendant son expédition dans les
du Nord. Ayant un jour fait faire l'exercice du canon, et les
leurs ne faisant feu qu'au commandement donné par l'officier,

plusieurs personnes placées à une assez grande distance des pièces, entendirent le bruit du canon avant d'avoir entendu le commandement de faire feu, ce qui indiquerait que les sons produits avec violence se propagent plus vite.

La vitesse du son varie d'un gaz à un autre, quoique la température soit la même. A l'aide des formules sur les tuyaux sonores (253), Dulong a trouvé qu'à la température de zéro, la vitesse du son, dans les gaz suivants, est :

Acide carbonique.	261 mètres.
Oxygène	317
Air	333
Oxyde de carbone	337
Hydrogène.	1269

210. **Formules pour calculer la vitesse du son dans les gaz.** — Newton, le premier, a donné pour calculer la vitesse du son dans les gaz, à la température de zéro, la formule $v=\sqrt{\frac{e}{d}}$, dans laquelle v représente la vitesse du son, c'est-à-dire l'espace qu'il parcourt en une seconde; e l'élasticité du gaz à zéro, et d sa densité aussi à zéro.

On conclut de cette formule que la vitesse de propagation du son dans un gaz *est directement proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité du gaz, et inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité.* D'où, pour un même gaz, cette vitesse reste constante, quelle que soit la pression; car, l'élasticité augmentant, la densité augmente dans le même rapport d'après la loi de Mariotte.

En représentant par g l'intensité de la pesanteur, par h la hauteur du baromètre ramenée à zéro, et par δ la densité du mercure aussi à zéro, il est évident que, pour un gaz soumis à la pression atmosphérique, l'élasticité e croissant comme chacune de ces quantités, on peut poser $e=gh\delta$. La formule de Newton devient donc, pour la température de zéro, $v=\sqrt{\frac{gh\delta}{d}}$.

Or la température d'un gaz augmentant de 0 à t degrés, son volume croît, et sa densité varie en raison inverse du volume; par conséquent, si l'on représente par 1 le volume du gaz à zéro, et par α l'accroissement que prend l'unité de volume en s'échauffant de 1 degré, le volume à t degrés sera $1+\alpha t$ (304). Par suite, la densité, qui est d à zéro, sera $\frac{d}{1+\alpha t}$ à t degrés. La formule de Newton, pour une température t, doit donc s'écrire

$$v'=\sqrt{\frac{gh\delta}{d}(1+\alpha t)}, \text{ ou } v'=\sqrt{\frac{gh\delta}{d}}\cdot\sqrt{1+\alpha t}=v\sqrt{1+\alpha t};$$

v' étant la vitesse à t degrés, et v la vitesse à zéro.

Les valeurs de v obtenues par cette formule ont toujours été plus petites que celles fournies par l'expérience. Laplace a donné, pour cause de cette différence, la chaleur qui se développe, par l'effet de la pression, dans les ondes condensées.

En s'appuyant sur les idées de Laplace, Poisson et Biot ont trouvé que la formule de Newton doit être ramenée à la forme $v=\sqrt{\frac{gh\delta}{d}(1+\alpha t)\frac{c}{c'}}$;

c étant la chaleur spécifique, à pression constante, du gaz dans lequel le son se propage (CHALEUR, chap. VII), et c' sa chaleur spécifique à volume constant. On

va voir que cette formule n'est pas, dans tous les cas, rigoureusement d'accord avec l'expérience (211).

* 211. **Expériences de M. Regnault sur la propagation des ondes.** — Dans la théorie mathématique qui a conduit à la formule ci-dessus, on a supposé les gaz *parfaits*, c'est-à-dire soumis rigoureusement à la loi de Mariotte, et tous également dilatables; de plus, on a admis que la compression qui existe dans l'onde condensée est infiniment petite par rapport à la pression barométrique que supporte le gaz. Or M. Regnault ayant trouvé qu'aucune de ces conditions n'est rigoureusement satisfaite, on devait s'attendre à ce que la formule et l'expérience ne seraient pas toujours d'accord; c'est, en effet, ce que prouvent les résultats suivants, obtenus récemment par M. Regnault.

1° Théoriquement, dans un tuyau cylindrique et rectiligne, une onde plane se propage avec une intensité constante (206); mais M. Regnault a observé que l'intensité de l'onde, dans un tuyau, décroît successivement, et que la distance à laquelle elle cesse d'être perceptible, dans le tuyau, est approximativement proportionnelle au diamètre de celui-ci.

On produisait des ondes d'égale intensité à l'aide d'un même pistolet chargé de 1 gramme de poudre et tiré à l'orifice de tuyaux de conduite de différents diamètres; puis on cherchait la distance à laquelle le son n'était plus appréciable à l'oreille, ou n'agissait plus sur une *membrane sensible*. On nomme ainsi une membrane très-flexible, fixée en travers des tuyaux et munie, à son centre, d'un petit disque de cuivre. Celui-ci, lorsque la membrane commence à vibrer, frappe un contact métallique, et ferme un courant électrique (296) qui va tracer sur un chronographe l'instant précis où la membrane a reçu l'onde sonore.

En expérimentant ainsi, M. Regnault a trouvé qu'un pistolet chargé de 1 gramme de poudre donne un son qui n'est plus perceptible à l'oreille quand il a parcouru

1159 mètres dans un tuyau d'un diamètre de	$0^m,108$
3810.	$0^m,300$
9540.	$1^m,100$

L'onde qui n'agit plus sur l'oreille agit encore sur les membranes, dans les tuyaux ci-dessus, respectivement aux distances de 4156, 11430 et 19851 mètres.

Suivant M. Regnault, la principale cause qui affaiblit l'intensité du son dans les tuyaux cylindriques est une perte de force vive (37) par la réaction des parois élastiques des tuyaux.

2° D'après la formule théorique de Biot et Poisson, la vitesse de propagation d'une onde est la même à toutes les distances, quelle que soit son intensité. Or M. Regnault a constaté que la vitesse, dans les tuyaux ci-dessus, diminue d'autant plus rapidement, que la section est moindre, phénomène résultant de la nature et du degré de poli des parois.

3° Les sons aigus se propagent dans les tuyaux beaucoup moins facilement que les sons graves; en effet, dans les tuyaux très-longs, pour bien entendre la voix humaine, il faut faire chanter une voix de baryton.

4° Ainsi que l'indique la formule théorique, l'expérience confirme que la vitesse de propagation dans les gaz est indépendante de la pression.

5° L'expérience vérifie encore que, dans des gaz différents, les vitesses sont en raison inverse des racines carrées des densités.

6° Enfin, en expérimentant dans l'air libre par la méthode des coups de canon réciproques, M. Regnault a trouvé que la vitesse du son, dans l'air libre, sec et à zéro, est de $330^m,7$, au lieu de 333 (209).

212. Vitesse du son dans les liquides et les solides. — La vitesse du son dans les liquides est beaucoup plus grande que dans l'air. Colladon et Sturm ont trouvé, par des expériences faites, en 1827, sur le lac de Genève, que la vitesse du son dans l'eau est de 1435

mètres à la température de 8°,1. C'est plus que le quadruple de celle qui a lieu dans l'air.

Dans les solides, la vitesse du son est encore plus grande. En expérimentant sur des tuyaux de fonte destinés à la conduite des eaux, Biot a trouvé que, dans la fonte, le son se propage 10,5 fois plus vite que dans l'air. La vitesse du son dans les autres solides a été déterminée théoriquement par Chladni, Savart, Masson et Wertheim, en s'appuyant, soit sur le nombre des vibrations longitudinales ou transversales des corps, soit sur leur coefficient d'élasticité. Chladni a trouvé, à l'aide des vibrations longitudinales, que, dans les différentes espèces de bois, la vitesse est de 10 à 16 fois plus grande que dans l'air. Dans les métaux, elle est plus variable, et égale de 4 à 16 fois celle qui a lieu dans l'air.

213. **Réflexion du son.** — Tant que les ondes sonores ne sont point gênées dans leur développement, elles se propagent sous

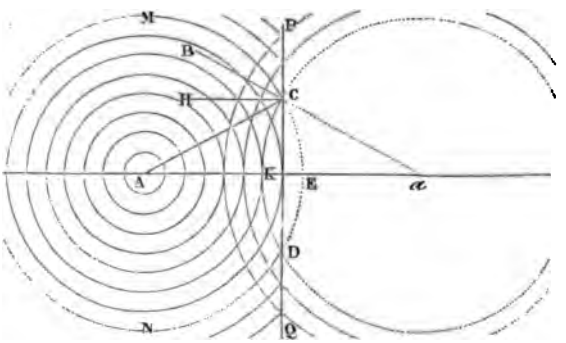


Fig. 173.

forme de sphères concentriques; mais lorsqu'elles rencontrent un obstacle, elles suivent la loi générale des corps élastiques, c'est-à-dire qu'elles reviennent sur elles-mêmes, en formant de nouvelles ondes concentriques qui semblent émaner d'un second centre situé de l'autre côté de l'obstacle, ce qu'on exprime en disant que les ondes sont *réfléchies*.

La figure 173 représente une suite d'ondes incidentes, réfléchies sur un obstacle PQ. Si l'on considère, par exemple, l'onde incidente MCDN, émise du centre A, l'onde réfléchie correspondante est représentée par l'arc CKD, dont le point *a* est le *centre virtuel*. La droite AC, suivant laquelle se propage le son de A en C, est un *rayon sonore;* et si l'on mène par le point C une perpen-

ılaire CH à la surface réfléchissante, l'angle ACH que fait le ›n sonore avec cette perpendiculaire se nomme *angle d'inci-ce;* enfin, l'angle BCH, que fait le rayon sonore réfléchi BC : la même perpendiculaire, est l'*angle de réflexion.*

ela posé, la réflexion du son est soumise aux deux lois sui-les, qui sont les mêmes pour la chaleur et la lumière :

' *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

' *Le rayon sonore incident et le rayon réfléchi sont dans un ıe plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

n verra (424) comment ces deux lois se vérifient pour la cha-au moyen de deux miroirs concaves placés en regard l'un de ıre à plusieurs mètres de distance. Or on les vérifie de la ıe manière pour le son, en suspendant une montre au foyer 'un des miroirs, et en plaçant l'oreille au foyer de l'autre. battements de la montre, renvoyés par un effet de réflexion ›remier miroir au second et à l'oreille, sont alors entendus inctement par l'observateur.

'après ces lois, l'onde qui, dans la figure, se propage suivant prend, après la réflexion, la direction CB; en sorte qu'un ›rvateur placé en B entend, outre le son parti du point A, un ıième son qui lui semble émis dans la direction CB.

.4. **Échos et résonnances.**— On nomme *écho* la répétition d'un dans l'air par l'effet de sa réflexion sur quelque obstacle.

›ur un son très-bref, comme un choc, il peut y avoir écho, que la surface réfléchissante est distante seulement de 17 res. C'est la limite qu'on admet ordinairement pour tous les ; mais pour les sons articulés, il faut au moins une distance ble, c'est-à-dire 34 mètres. En effet, il est facile de constater ›n ne peut prononcer ou entendre bien distinctement plus de | syllabes par seconde. Or la vitesse du son étant de 340 res par seconde, il s'ensuit que, dans un cinquième de se-de, le son parcourt 68 mètres. Par conséquent, si l'obstacle échissant est à une distance de 34 mètres, le son, tant pour r jusqu'à l'obstacle que pour revenir, aura 68 mètres à par-rir. Le temps écoulé entre le son articulé et le son réfléchi ı donc d'un cinquième de seconde; dès lors les deux sons ne confondront pas, et le son réfléchi sera entendu distinctement.

près ce qui précède, si l'on parle à voix haute devant un ré-teur distant de 34 mètres, on ne peut distinguer que la der-ıe syllabe réfléchie; l'écho est donc *monosyllabique.* Si le ré-teur est distant de deux fois, trois fois 34 mètres, l'écho sera *ıyllabique, trissyllabique,* et ainsi de suite.

Lorsque la distance de la surface réfléchissante est moindre que

34 mètres, le son direct et le son réfléchi tendant à se confond on ne peut les entendre séparément; mais le son se trouve r forcé, ce qu'on exprime en disant qu'il y a *résonnance*. C'es qu'on observe dans les grands appartements. Les salles nues t très-retentissantes; au contraire, les tentures, les draperies, réfléchissent mal le son, rendent les appartements *sourds*.

On nomme *échos multiples* ceux qui répètent plusieurs fo même son : c'est ce qui arrive lorsque deux obstacles placés vis-à-vis de l'autre, deux murs parallèles par exemple, se voient successivement le son. Il existe des échos qui répè ainsi jusqu'à vingt ou trente fois le même son. On cite par lièrement celui du château de Simonetta, en Italie.

Lorsqu'on parle sous une arche de pont de pierre, la face née contre l'une des piles, la voix peut se reproduire aupr l'autre pile avec assez d'intensité pour qu'on entretienne une conversation à voix basse, sans que des personnes pla dans l'espace intermédiaire puissent l'entendre. Il existe, au re chaussée du Conservatoire des arts et métiers de Paris, une carrée, à voûte elliptique, qui présente ce phénomène d'une nière remarquable, lorsqu'on se place aux deux foyers de l'ell

Du reste, le son ne se réfléchit pas seulement à la surfac corps solides; il se réfléchit aussi sur les nuages, à la renc d'une couche d'air de densité différente de celle qu'il vien traverser, enfin sur les vésicules mêmes des brouillards. On serve, en effet, que, si l'air est brumeux, les sons subissent foule de réflexions partielles, et s'éteignent rapidement. C'e nuit, lorsque l'air est calme et d'une densité uniforme, qu sons peuvent être entendus de plus loin.

215. **Réfraction du son.** — On verra plus tard qu'on en par *réfraction* un changement de direction qu'éprouvent l mière et la chaleur en passant d'un milieu dans un autre Sondhauss a constaté que les ondes sonores se réfractent co la chaleur et la lumière.

Pour cela, on coupe, sur un grand ballon de collodion, segments égaux, et on les fixe sur les deux faces d'un anneau de ayant 31 centimètres de diamètre, de manière à former une tille biconvexe, creuse, dont l'épaisseur, au centre, est d'en 12 centimètres. Puis, remplissant d'acide carbonique la le ainsi formée, on place une montre sur la direction de l'axe, cherche ensuite, de l'autre côté de la lentille, le point où le de la montre est entendu avec plus d'intensité. On observe que, tant que l'oreille est éloignée de l'axe, le son est à peine ceptible; mais que, lorsqu'elle est sur l'axe, à une distance

de la lentille, le son est entendu très-distinctement : les onores, à leur sortie de la lentille, viennent donc concou- l'axe, ce qui montre qu'elles ont changé de direction, et, séquent, qu'elles se sont réfractées.

Porte-voix, cornet acoustique. — Le *porte-voix* et le *cor- ustique* sont deux instruments fondés à la fois sur le ren- nt et la conductibilité du son par les tuyaux (208).

rte-voix, ainsi que l'indique son nom, est destiné à trans- la voix à de grandes distances. C'est un tube de fer-blanc

Fig. 174.

iton (fig. 174), légèrement conique et très-évasé à l'une de ertures, qu'on nomme *pavillon*. Cet instrument, qui s'em- par l'autre extrémité, porte la voix d'autant plus loin, dimensions sont plus grandes. On explique, en général, s du porte-voix par une suite de réflexions successives des onores sur les parois du tube, réflexions en vertu des- les ondes tendent à se propager de plus en plus suivant ection parallèle à l'axe de l'instrument. On a objecté à cette que les sons émis à travers le porte-voix ne sont pas ren- eulement dans la direction de son axe, mais dans toutes ; e que le pavillon serait inutile pour obtenir le parallé- es rayons sonores, tandis qu'au contraire il exerce une in- considérable sur l'intensité des sons transmis. Enfin, en t d'une étoffe de laine l'intérieur du porte-voix, l'effet en affaibli. Les effets de cet instrument doivent donc plutôt liqués par un renforcement produit par la colonne d'air dans le tube, laquelle vibre à l'unisson, à mesure qu'on son extrémité. Quant à l'effet du pavillon, on n'en a point asqu'ici d'explication satisfaisante.

rnet acoustique sert aux personnes qui ont l'oreille *dure*. tube conique de métal, dont l'une des extrémités, ter- n pavillon, est destinée à recevoir le son, tandis que xtrémité est introduite dans l'oreille. Le pavillon sert ici chure, c'est-à-dire qu'il reçoit les sons venant de la de la personne qui parle. Ces sons se transmettent par une réflexions dans l'intérieur du cornet, en sorte que les ui eussent pris un grand développement se trouvent con-

centrées dans l'appareil auditif, et y produisent un effet beaucoup plus sensible que ne l'eussent fait des ondes divergentes.

217. **Stéthoscope.** — On nomme ainsi un petit instrument dont on se sert en médecine pour ausculter les malades. On en a imaginé plusieurs. Nous donnons ici celui construit par Kœnig. C'est une espèce de cornet acoustique consistant en une capsule de cuivre fermée par une membrane de caoutchouc *c*, et divisée à l'intérieur en deux compartiments par une seconde membrane *a*, de manière qu'en insufflant, par un robinet latéral, de l'air entre

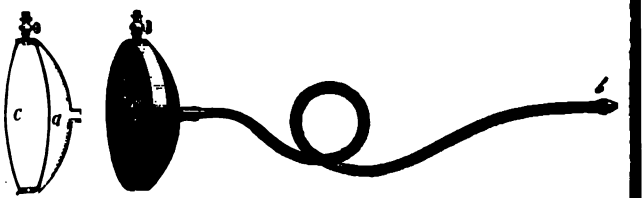


Fig. 175. Fig. 176.

les deux membranes, elles prennent la forme d'une lentille convexe, comme le montre, en coupe, la figure 175. Du centre de la capsule de cuivre part un tuyau de caoutchouc terminé par un bout de corne ou d'ivoire *b*, qu'on introduit dans l'oreille (fig. 176).

En appliquant la membrane *c* sur la poitrine d'un malade, les battements du cœur et les bruits de la respiration se transmettent fidèlement à l'air renfermé dans la chambre *ca*, et de là à l'oreille par le tuyau de caoutchouc. On peut même s'ausculter soi-même, et si plusieurs tuyaux sont adaptés à l'appareil, autant d'observateurs peuvent ausculter simultanément le même sujet.

CHAPITRE II

MESURE DU NOMBRE DES VIBRATIONS

218. **Méthodes pour mesurer le nombre des vibrations.** — Ces méthodes sont : 1° la méthode acoustique, comprenant la sirène et la roue de Savart ; 2° la méthode graphique, comprenant l'appareil de Duhamel et le phonautographe de Scott ; 3° la méthode optique de Lissajous ; 4° les flammes manométriques.

219. **Sirène.** — La *sirène* est un petit appareil qui sert à mesurer le nombre des vibrations d'un corps sonore en un temps donné. Cagniard-Latour, qui en est l'inventeur, a donné le nom de sirène à

cet instrument, parce qu'on peut lui faire rendre des sons sous l'eau.

La figure 177 représente la sirène montée sur le sommier d'une soufflerie (220), et les figures 178 et 179 en donnent les détails intérieurs. A la partie inférieure de l'instrument, qui est tout de cuivre, est une caisse cylindrique O, recouverte d'un plateau fixe B. Sur ce plateau s'appuie une tige verticale T, à laquelle est

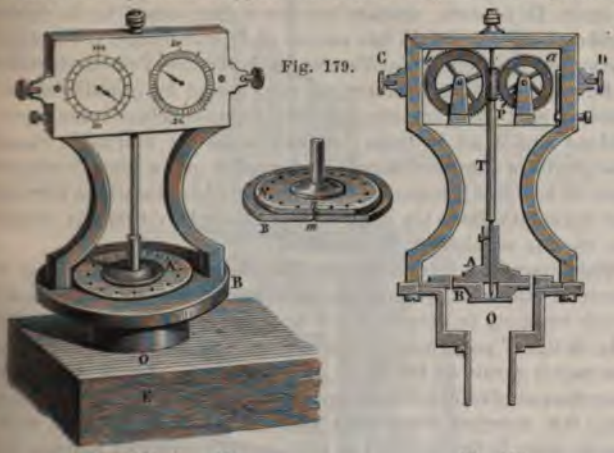


Fig. 177 (h=17). Fig. 178.

fixé un disque A, qui peut tourner librement avec la tige; des trous circulaires équidistants sont pratiqués dans le plateau B, et dans le disque A se trouve un nombre égal de trous de même grandeur et à la même distance du centre que ceux du plateau. Ces trous ne sont point perpendiculaires aux plans du plateau et du disque; mais, inclinés tous de la même quantité dans le plateau, ils le sont en sens contraire dans le disque, de manière que, lorsque les trous du plateau et ceux du disque sont en regard, ils sont disposés comme le représente la figure 179, qui donne une coupe des deux disques A et B suivant les deux trous antérieurs, au moment où ils se correspondent. Il résulte de cette disposition que, lorsqu'un courant d'air rapide arrive de la soufflerie dans la caisse cylindrique et dans le trou *m*, il frappe obliquement les parois du trou *n*, et imprime au disque A un mouvement de rotation dans le sens A*n*.

Pour simplifier l'explication du jeu de la sirène, supposons d'abord que, le disque mobile A portant 18 trous, le plateau fixe B ne soit percé que d'un seul, et considérons le cas où celui-ci coïncide

avec un des trous supérieurs. Le vent de la soufflerie venant à frapper obliquement la paroi de ce dernier, le disque mobile se met à tourner, et le plein qui se trouve entre deux trous consécutifs vient fermer le trou du plateau inférieur. Mais le disque continuant à tourner, en vertu de sa vitesse acquise, deux trous se trouvent de nouveau en regard, d'où résulte une nouvelle impulsion, et ainsi de suite. De la sorte, pendant une révolution complète du disque, l'orifice inférieur est 18 fois ouvert et 18 fois fermé. Il en résulte une suite d'écoulements et d'arrêts qui font entrer l'air en vibration, et finissent ainsi par produire un son, quand les impulsions successives sont assez rapides. Si l'on suppose actuellement que le plateau fixe B ait 18 trous, comme le disque tournant, chaque trou produira simultanément le même effet qu'un seul; le son sera donc 18 fois plus intense, mais le nombre des vibrations n'en sera pas augmenté. Dans les deux cas, il est de 18 vibrations doubles par chaque révolution du disque A.

Pour connaître le nombre de vibrations correspondant au son que rend l'appareil pendant son mouvement de rotation, il reste à savoir combien le disque A fait de révolutions par seconde. Pour cela, la tige T porte une vis sans fin qui transmet le mouvement à une roue *a* garnie de 100 dents. Cette roue, qui avance d'une dent pour chaque révolution du disque, porte un taquet P, qui, à chaque tour, fait marcher d'une dent une seconde roue *b* qu'on voit à gauche dans la figure 178. Les axes de ces roues font tourner deux aiguilles qui se meuvent sur des cadrans (fig. 177). Ces aiguilles indiquent, l'une le nombre des tours du disque A, l'autre les centaines de tours. Deux boutons D et C servent à engrener ou à désengrener à volonté la petite roue *a* avec la vis sans fin.

Comme le son s'élève à mesure que la vitesse du disque A s'accroît, il suffit de forcer le vent de la soufflerie pour parvenir à faire rendre à l'appareil un son déterminé. On entretient alors le même courant d'air pendant un certain temps, 20 secondes par exemple; puis on lit sur le cadran le nombre de tours qu'a fait le disque. En multipliant ce nombre par 18 et divisant le produit par le nombre de secondes 20, le quotient indique le nombre de vibrations doubles par seconde.

La sirène, à vitesse égale, donne le même son sous l'eau que dans l'air; il en est de même dans tous les gaz : ce qui fait voir qu'un son déterminé ne dépend que du nombre des vibrations, non de la nature du corps sonore.

220. **Soufflerie.** — La *soufflerie* sert à faire *parler* les tuyaux. Elle se compose d'un fort soufflet S, qui est placé entre les quatre pieds d'une table, et marche au moyen d'une pédale P (fig. 18

r refoulé par le soufflet se rend dans un réservoir de cuir R, -flexible, qui se gonfle à mesure que l'air y arrive. Comprimé deux plaques de plomb qui chargent le réservoir, l'air passe un tuyau A dans un coffre *mn*, qui est placé sur la table et on nomme *sommier;* de là il se distribue aux différents tuyaux

Fig. 180 (h = 1m,50).

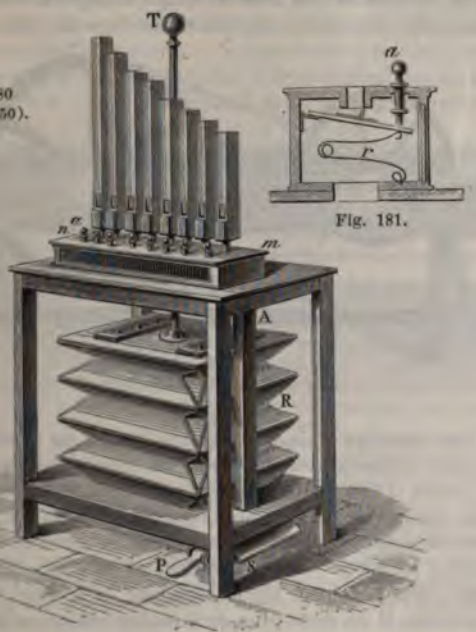


Fig. 181.

cés dessus. Pour cela, les trous dans lesquels s'engagent les ds des tuyaux sont fermés par des soupapes *s* (fig. 181) qui s'op- ent au passage de l'air; mais devant chaque tuyau est une che *a*, qui, lorsqu'on appuie dessus, fait ouvrir la soupape et se passer l'air. Au-dessous de la soupape est un ressort *r*, qui soulève dès qu'on cesse d'appuyer sur la touche.

21. **Roue de Savart.** — La *roue de Savart*, ainsi nommée du n de son inventeur, est un appareil destiné à faire connaître nombre absolu de vibrations qui correspond à un son déter- né. Il est formé d'un banc de chêne solidement établi et ouvert s toute sa longueur. Dans l'ouverture sont montées deux roues t B (fig. 182) : la première sert à imprimer une grande vitesse

à la plus petite, et cette dernière, qui est garnie de dents, est destinée à faire vibrer une carte E fixée sur le banc. Cette carte, étant choquée au passage de chaque dent, fait, par révolution de la petite roue, autant de vibrations complètes qu'il y a de dents. Enfin, sur le côté de l'appareil est un compteur H, qui reçoit son mouvement de l'axe de la roue dentée, et qui indique le nombre de tours et, par suite, le nombre de vibrations dans un temps donné.

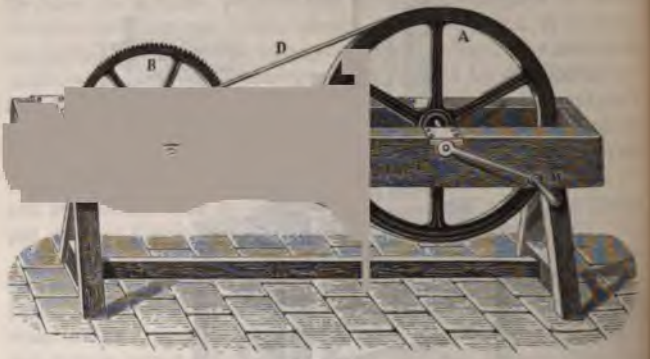


Fig. 182.

Si l'on imprime d'abord à la roue dentée un mouvement lent, on entend distinctement les chocs successifs des dents contre la carte; mais si l'on augmente graduellement la vitesse, on obtient un son continu de plus en plus élevé. Lorsqu'on est parvenu à reproduire le son dont on veut connaître le nombre de vibrations, on entretient la même vitesse pendant un nombre de secondes déterminé; lisant ensuite, sur le compteur, le nombre de tours de la roue dentée, il ne reste plus qu'à multiplier ce nombre par celui des dents, pour obtenir le nombre total des vibrations. Divisant enfin ce produit par le nombre de secondes correspondant, le quotient donne le nombre de vibrations par seconde.

222. **Limite des sons perceptibles.** — Avant les travaux de Savart, les physiciens admettaient que l'ouïe cessait de percevoir le son lorsque le nombre des vibrations doubles, par seconde, était au-dessous de 16 pour les sons graves, et au-dessus de 9 000 pour les sons aigus. Mais ce savant a fait voir que ces limites étaient trop resserrées, et que la faculté de percevoir des sons très-graves ou très-aigus dépend plutôt de l'intensité que de la hauteur; de sorte que, quand les sons extrêmes ne sont pas entendus, cela tient à ce que ces sons n'ont pas été produits avec une intensité suffisante pour impressionner l'organe de l'ouïe.

gmentant le diamètre de sa roue dentée, et, par suite, l'am-
et l'intensité des vibrations, Savart a reculé la limite des
us jusqu'à 24 000 vibrations doubles par seconde.
les sons graves, il a substitué à sa roue dentée une barre
e 65 centimètres de longueur, tournant entre deux lames
minces, distantes de la barre de 2 millimètres seulement.
e passage, il se produit un son sec, dû au déplacement de
mouvement s'accélérant, le son devient continu, extré-
plein et assourdissant. Savart a trouvé ainsi que lorsqu'il
iit de 7 à 8 vibrations doubles par seconde, l'oreille per-
ore un son bien déterminé, mais très-grave.
etz, qui a fait des recherches sur le même sujet, a trouvé
tions doubles pour limite des sons graves, et 36 850 pour
es sons aigus.
admet 30 vibrations doubles pour limite inférieure des
ceptibles à l'oreille, et 20 000 pour limite supérieure. Ces
du reste, varient d'un observateur à un autre.

Méthode graphique. — En faisant usage de la sirène ou de la roue
. Il est difficile de déterminer avec précision le nombre de vibrations
lant à un son donné, puisqu'il faut les mettre à l'unisson de celui-ci,
mande une oreille exercée. La méthode graphique ne présente pas cette
Elle consiste à fixer sur le corps sonore un style léger qui en trace
ions sur une surface convenablement préparée.
eil suivant, fondé sur cette méthode et imaginé par Duhamel, con-
n cylindre A, de bois ou de métal, fixé à un axe vertical O (fig. 183).
urner celui-ci à l'aide d'une manivelle, et, tout en tournant dans un
ans l'autre, il prend un mouvement de haut en bas ou de bas en
moyen d'un pas de vis tracé sur l'axe même et passant dans un
itour du cylindre est enroulée une feuille de papier sur laquelle est
ne couche légère et non adhérente de noir de fumée. C'est sur cette
ne s'inscrivent les vibrations. Pour cela, le corps sonore étant, par
une lame élastique C solidement encastrée à une de ses extrémités, on
utre un style léger qui rase la surface du cylindre pendant sa rota-
celui-ci tourne sans que la lame vibre, le style trace en blanc sur le
un trait hélicoïdal régulier; mais si la lame vibre, le trait est ondulé,
d'ondulations, autant de vibrations de la lame. Il ne reste plus qu'à
r le temps pendant lequel se sont effectuées ces vibrations.
it y arriver de plusieurs manières : la plus simple est de comparer la
acée par la lame vibrante à celle tracée par un diapason (237) qui
r seconde un nombre de vibrations connu, 500 par exemple. Une des
du diapason étant, elle aussi, munie d'un style léger, on met celui-ci
t avec le noir de fumée, puis on fait vibrer simultanément la lame et
on; les deux styles tracent alors deux hélices ondulées, mais inégale-
, en déroulant la feuille de papier (fig. 184), et en comparant les
d'oscillations qui se correspondent sur les deux courbes, il est facile
aire combien la lame fait de vibrations par seconde. Par exemple, sup-
d'à 150 vibrations du diapason en correspondent 165 de la lame, chaque
du diapason étant, par hypothèse, de $\frac{1}{500}$ de seconde, 150 vibrations
ident à $\frac{150}{500}$ de seconde; c'est donc en $\frac{150}{500}$ de seconde que la lame

a fait 165 vibrations. Par suite, en $\frac{1}{500}$ de seconde, elle en fait $\frac{165}{150}$, une seconde $\frac{165 \times 500}{150}$, ou 550.

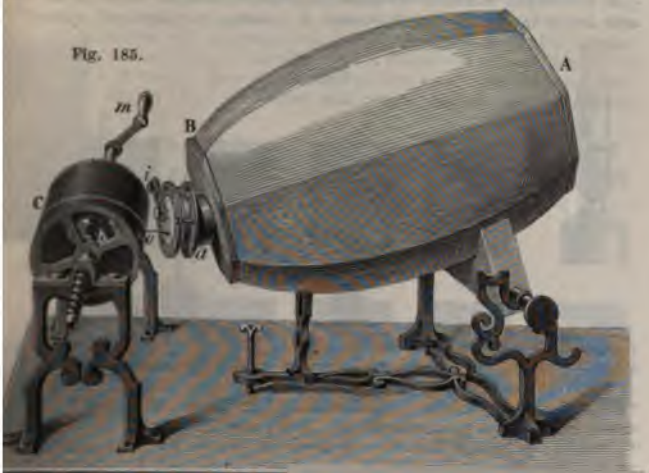
Fig. 184.

Fig.

* 224. **Phonautographe de L. Scott.** — L'appareil que nous vene crire ne peut inscrire les vibrations des tuyaux sonores, du chant, d'un br conque. M. L. Scott a généralisé la méthode graphique dans le *phonautogr* inscrit tous les sons. Cet appareil se compose d'un ellipsoïde creux AB (de plâtre ou de métal, ayant environ 50 centimètres de long, sur 3 mètre. L'extrémité A est ouverte et reçoit les sons extérieurs; l'autre e par un fond solide, au centre duquel est adapté un tuyau *a*, coudé et par un anneau, sur lequel est fixée une membrane flexible de baudruc caoutchouc très-mince. Un second anneau, qui se serre plus ou moi premier à l'aide de vis, sert à tendre à volonté la membrane, qui, du r vibre bien à l'unisson qu'autant qu'elle n'est que peu tendue. On peut le tuyau *a* sur lui-même, de manière à faire prendre toutes les inclin la membrane. Sur cette dernière, près du centre, est fixé, avec de l cacheter, un style *o* extrêmement léger, participant à tous les mouven la membrane. Afin que ce style ne se trouve pas correspondre à un n vibration, M. Scott adapte, sur l'anneau tenseur de la membrane, une p bile *i*, qu'il en nomme le *subdiviseur*, et qui, en la touchant en te point, à la volonté de l'expérimentateur, modifie la position des nœuds, nière que le style corresponde à un ventre (244), et, par suite, vibre membrane. Les vibrations de celle-ci s'inscrivent ensuite, identiquement dans l'appareil de Duhamel, sur un cylindre tournant, autour duquel s une feuille de papier recouverte de noir de fumée. Le cylindre avançan le sens de son axe, le style *o* trace fidèlement les vibrations que les on

sonores dans la caisse AB transmettent à la membrane. Pour fixer les épreuves ainsi obtenues, M. Scott les trempe d'abord dans un bain d'alcool; puis, quand

Fig. 185.



elles sont séchées, dans un second bain d'alcool tenant en dissolution une résine, la sandaraque par exemple.

Au lieu de donner au phonautographe la forme d'un ellipsoïde, comme ci-dessus, on lui donne aujourd'hui celle d'un paraboloïde dont la membrane occupe le foyer, ce qui augmente la sensibilité de l'appareil.

[illegible] 225. **Méthode optique de Lissajous.** — Dès 1827, M. Weatstone, en Angleterre, avait imaginé, sous le nom de *calédophone*, un petit appareil qui reproduit, en traits lumineux, les vibrations sonores. C'est une série de verges métalliques, de métal, à section rectangulaire, solidement encastrées d'un bout, terminées de l'autre par une petite perle qu'on éclaire avec une lampe. En imprimant à une pareille verge des chocs qui la fassent vibrer à la fois suivant les deux dimensions de sa section, le point brillant de la perle décrit des courbes qui paraissent continues à cause de la persistance de la sensation lumineuse, et dont la forme varie avec le rapport des nombres de vibrations dans les deux sens.

M. Lissajous a perfectionné la méthode optique en prenant pour corps sonores des diapasons dont l'une des branches est armée d'un petit réflecteur et l'autre d'un contre-poids, et il en a fait une heureuse application à la composition de deux mouvements vibratoires parallèles, puis de deux mouvements rectangulaires. Il est parvenu ainsi à dessiner en traits de feu des courbes qui caractérisent les vibrations transversales ou tournantes, l'accord, l'octave, la tierce, la quarte, la quinte, les dissonances, les battements, les sons résultants.

* 226. **Composition de deux mouvements vibratoires parallèles.** — Pour composer deux mouvements parallèles, deux diapasons armés de miroirs sont disposés en regard l'un de l'autre (fig. 186), de manière qu'un faisceau lumi-

neux émis d'une lampe et réfléchi sur le miroir se revienne sur le miroir de là sur une lentille qui projette l'image sur un écran.

Si l'on ne fait vibrer qu'un diapason, l'image s'allonge; si on les fait tous les deux, supposés parfaitement à l'unisson, l'allongement augm

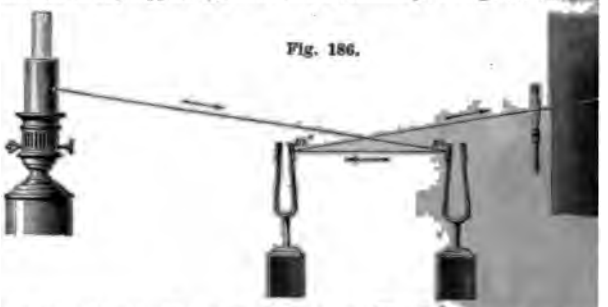


Fig. 186.

diminue, suivant qu'il y a concordance ou discordance entre les mou simultanés imprimés à l'image par les vibrations des miroirs.

Si les deux diapasons passent en même temps et dans le même sens forme d'équilibre, l'image atteint son maximum de grandeur. S'ils y pa même temps, mais en sens contraires, il y a minimum. Entre ces deux l'amplitude de l'image varie avec le temps qui s'écoule entre les momen où les deux diapasons passent par leur forme d'équilibre. Le rapport temps et la durée d'une vibration double a été désigné par M. Lissajou dénomination de *différence de phase*.

Lorsque les diapasons sont rigoureusement d'accord, la trace lumineu

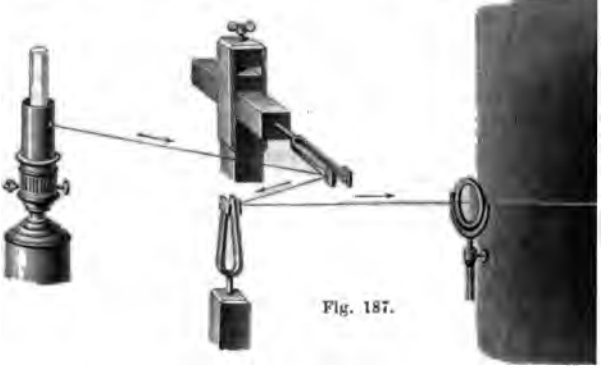


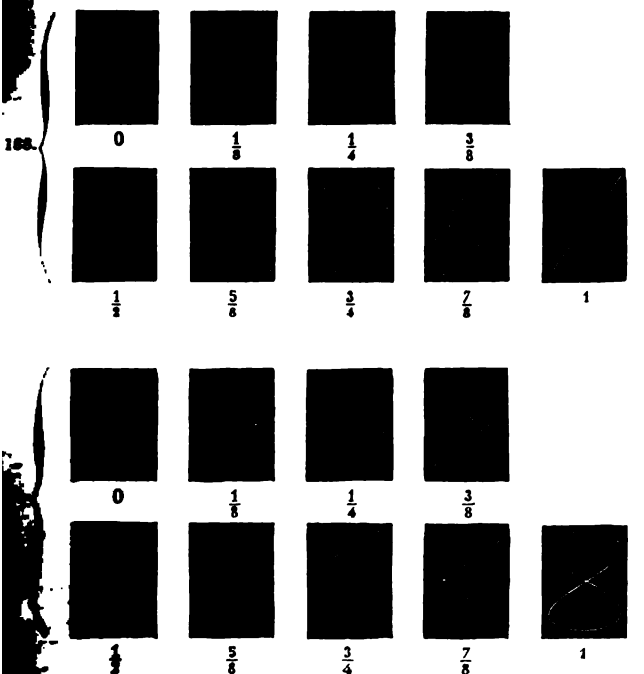
Fig. 187.

sur l'écran n'éprouve qu'un décroissement progressif de longueur, à me l'amplitude des vibrations diminue; mais si l'accord est tant soit peu a grandeur de l'image varie périodiquement, et tandis que l'oreille en battements (231) qui résultent du défaut d'accord, l'œil voit nettement sations concomitantes de l'image.

*** 227. Composition optique de deux mouvements vibratoires re**

res. — La composition optique de deux mouvements vibratoires rectangu-
res s'opère comme le montre la figure 187, c'est-à-dire à l'aide de deux dia-
sons, l'un horizontal, l'autre vertical, et armés tous les deux de miroirs
me dans l'expérience précédente. Si l'on ne fait vibrer d'abord que le dia-
n horizontal, on voit se former sur l'écran une trace lumineuse horizon-
; si c'est le second diapason qui vibre seul, l'image est verticale. Mais si l'on
faisonner à la fois les deux diapasons, les deux mouvements se combinent,
faisceau réfléchi décrit sur l'écran une courbe plus ou moins compliquée,

188.



forme dépend du rapport entre les nombres de vibrations exécutés dans
temps par les deux diapasons.
ure 188 représente les différentes formes de la projection lumineuse sur
quand les deux diapasons sont à l'unisson.
fractions placées au-dessous de chaque courbe indiquent les différences
ases correspondant à chacune d'elles. C'est la différence de phase qui dé-
me la forme initiale de la courbe; mais celle-ci conserve exactement la
forme lorsque les diapasons sont d'accord, à la condition, toutefois, que
mplitudes des deux vibrations rectangulaires décroissent dans le même
ort.
les diapasons ne sont pas tout à fait d'accord, la différence

phase ne se maintient pas, et la courbe passe par toutes ses variétés; et elle semble se balancer sur elle-même avec d'autant plus de rapidité que les diapasons sont plus loin de l'accord.

La figure 189 représente les différents aspects qu'offre l'image lumineuse quand les diapasons sont à l'octave, c'est-à-dire quand leur nombre de vibrations sont entre eux comme 1 est à 2.

* 228. **Flammes manométriques de Kœnig.** — La méthode de Kœnig consiste à transmettre le mouvement des ondes sonores qui constituent un son à des flammes de gaz qui, par leurs trépidations, font connaître la nature du

Fig. 190. Fig. 191.

sons. Pour cela, une capsule métallique représentée en coupe en A (fig. 190) est divisée en deux compartiments par une membrane mince de caoutchouc; sur la droite de la figure est un bec de gaz, et au-dessous un robinet sur lequel s'adapte un tuyau de caoutchouc qui amène le gaz d'éclairage; à gauche est une tubulure sur laquelle s'applique un second tuyau de caoutchouc. Celui-ci se rend au nœud d'un tuyau sonore, comme on le voit ci-après dans la figure 212; ou bien il se termine par une embouchure à l'ouverture de laquelle on chante telle ou telle note. C'est cette disposition qui est représentée ci-dessus.

Lorsque les ondes pénètrent, par l'embouchure et le tuyau, dans la capsule, la membrane de celle-ci cédant aux condensations et aux raréfactions des ondes, le gaz d'éclairage, dans le compartiment à droite, se trouve alternativement comprimé et dilaté, et de là résultent, dans la flamme du bec, des allongements et des raccourcissements peu apparents lorsqu'on regarde la flamme. Pour les rendre sensibles, pour les séparer, on reçoit l'image de celle-ci sur un miroir à quatre faces M (fig. 191), qu'on fait tourner à l'aide de deux roues d'angle et d'une manivelle. Alors, si la capsule est en communication avec un tuyau sonore rendant le son fondamental, l'image de la flamme prend la forme

ntée dans la figure 192; et celle de la figure 193, si le tuyau rend le son
ave. Si les deux sons arrivent simultanément à la capsule, l'image prend

Fig. 192.

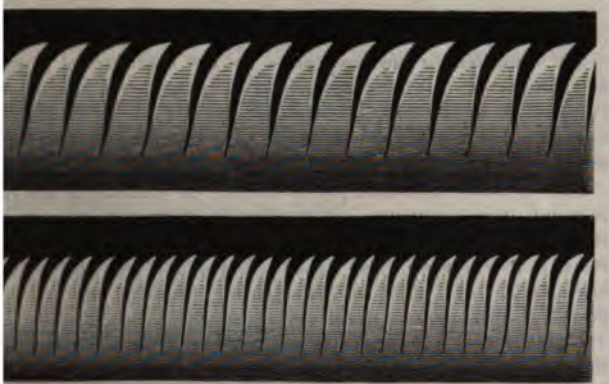


Fig. 193.

de la figure 194; mais il faut alors que le tuyau qui se rend à la capsule
nique en même temps, au moyen d'un tube en T, avec deux tuyaux so-

Fig. 194.

Fig. 195.

rendant l'un le son fondamental, l'autre l'octave. Si l'un rend le son
ental, et l'autre la tierce, la flamme offre la figure 195.
rra plus loin l'application du même appareil à l'analyse des sons (264).

CHAPITRE III

THÉORIE PHYSIQUE DE LA MUSIQUE

229. **Qualités du son musical.** — Le *son musical* est le résultat de vibrations continues, rapides et isochrones, qui produisent sur l'organe de l'ouïe une sensation prolongée. On peut toujours le comparer à d'autres sons et en prendre l'unisson, ce qui ne peut se faire pour le bruit (202).

Un son étant déterminé par le nombre de vibrations qui lui correspond, on est convenu, pour comparer entre eux les sons, de les représenter par leur nombre de vibrations, non pas absolu, mais relatif. Par exemple, trois sons correspondant aux nombres de vibrations 72, 144, 288, on représente le premier par 1, le second par 2, et le troisième par 4.

L'oreille distingue dans le son musical trois qualités particulières : la *hauteur*, l'*intensité* et le *timbre*.

Hauteur. — La *hauteur* est l'impression qui résulte, pour l'organe de l'ouïe, du plus ou moins grand nombre de vibrations dans un temps donné. On nomme *sons graves* ceux qui sont produits par un petit nombre de vibrations, et *sons aigus* ceux qui sont le résultat d'un grand nombre de vibrations. Il n'y aurait donc de sons absolument graves ou aigus que ceux qui se trouveraient aux extrémités de l'échelle des sons perceptibles. Tous les sons intermédiaires ne sont graves ou aigus que d'une manière relative. Toutefois on dit un *son grave* ou un *son aigu*, comme on dit une *basse température* ou une *température élevée*, en comparant le son à ceux qu'on entend le plus ordinairement.

Le rapport de gravité ou d'acuité de deux sons se nomme *ton*, c'est-à-dire que ce mot exprime le degré de hauteur d'un son : au point de vue musical, il exprime le degré de hauteur de la gamme dans laquelle on joue.

Intensité. — On a vu (207) que l'*intensité*, ou la force du son, dépend de l'amplitude des oscillations et non de leur nombre. Un même son peut conserver le même degré de gravité ou d'acuité et prendre une intensité plus ou moins grande, lorsqu'on fait varier l'amplitude des oscillations. C'est ce qui arrive pour une corde tendue, qu'on écarte plus ou moins de sa position d'équilibre.

Timbre. — Le *timbre* est ce qui fait que, deux instruments différents rendant chacun un son de même hauteur et de même intensité, ces deux sons peuvent être parfaitement distingués l'un de l'autre. Le son du hautbois, par exemple, est très-distinct de celui

ète; le son du cor, de celui du basson. De même la voix e présente un timbre bien différent, suivant les individus, . le sexe.

longtemps ignoré la cause du timbre : ce n'est qu'en 1863 mholtz a fait voir que le timbre particulier qui caractérise est dû aux harmoniques (233) plus ou moins nombreux compagnent. Nous reviendrons sur ce sujet en faisant con- 'analyse et la synthèse des sons (263).

Unisson. — Deux sons produits par un même nombre de ns sont dits *à l'unisson* : ils sont alors de *même hauteur*, lire également graves ou aigus.

Battements. — Lorsque deux sons qui ne sont pas à l'unis- produisent simultanément, on entend, à des intervalles un renforcement du son, qu'on nomme *battement*. Par e, que les nombres de vibrations, pour deux sons, soient 30 près 30 vibrations du premier, ou 31 du second, il y aura ence, et, par suite, battement. Si les battements sont assez hés pour produire un son continu, ce son sera évidemment ave que ceux dont il dérive, puisqu'il provient d'une seule on, quand les autres proviennent de 30 et 31.

Accords, intervalles. — On nomme *accord* la coexistence ieurs sons produisant sur l'oreille une sensation agréable. rgane est péniblement affecté, on dit qu'il y a *dissonance*. *ervalle* entre deux sons est le rapport $\frac{n'}{n}$ de leurs nombres ations, n' étant toujours plus grand que n; c'est-à-dire st convenu de prendre pour premier terme du rapport le plus aigu. Comme la fraction $\frac{n'}{n}$ ne change pas de valeur on multiplie ou divise ses deux termes par un même nom- n voit que l'intervalle de deux sons ne dépend pas du absolu de vibrations, mais du nombre relatif.

ille n'est agréablement affectée qu'autant que les deux du rapport $\frac{n'}{n}$ sont de petits nombres, et l'on dit alors qu'il *onnance*. Les intervalles les plus agréables à l'oreille sont :

$\frac{n'}{n} = 1$, c'est l'*unisson*.	$\frac{n'}{n} = \frac{4}{3}$ . . . . la *quarte*.
$\frac{n'}{n} = \frac{2}{1}$ . . . . l'*octave*.	$\frac{n'}{n} = \frac{5}{4}$ . . . . la *tierce majeure*.
$\frac{n'}{n} = \frac{5}{3}$ . . . . la *sixte*.	$\frac{n'}{n} = \frac{6}{5}$ . . . . la *tierce mineure*.
$\frac{n'}{n} = \frac{3}{2}$ . . . . la *quinte*.	

Ces rapports se rencontrent fréquemment, et il importe de retenir. Toutes les fois que les nombres de vibrations de deux sont entre eux comme 2 est à 1, ou comme 3 est à 2, ou comme est à 3, on dit, du plus aigu, qu'il donne l'octave, la quinte quarte de l'autre son; et réciproquement, si l'on dit de deux qu'ils forment une quarte, une tierce majeure..., cela signifie leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 4 est à 3 comme 5 est à 4, et ainsi de suite.

233. **Harmoniques.** — On nomme *sons harmoniques*, ou sim ment *harmoniques*, des sons dont les nombres de vibrations entre eux comme la suite naturelle des nombres entiers 1, 4, 5, 6.... La superposition de deux de ces sons donne un so d'autant plus consonnant, qu'on les prend plus bas dans la s En effet, le deuxième harmonique est l'octave du premier; le sième, qui revient à $\frac{3}{2} \times 2$, en est la double quinte; le quatri qui peut s'écrire 2×2, en est la double octave; le cinquième équivaut à $\frac{5}{4} \times 4$, en est la quadruple tierce. De plus, les premiers harmoniques donnent l'octave; le second et le troisi la quinte; le troisième et le quatrième, la quarte; le quatr et le cinquième, la tierce. Les harmoniques ne donnent don des accords, d'où leur vient leur nom. Toutefois ceci n'est que pour les premiers sons de la série; car plus on s'élève, l'accord tend à se changer en dissonance.

234. **Échelle musicale, gamme.** — On nomme *échelle mus* une série de sons séparés les uns des autres par des intervalle paraissent avoir leur origine dans la nature de notre organis

Dans cette série, les sons se reproduisant dans le même or par période de sept, chaque période se désigne sous le no *gamme*, et les sept sons ou *notes* de chaque gamme, par les *ut, ré, mi, fa, sol, la, si.*

En comparant entre eux, soit à l'aide de la sirène (219), s l'aide de la roue de Savart ou de la méthode graphique (221 et 2 les nombres de vibrations des sept notes de la gamme, et en présentant le son le plus grave, l'*ut* fondamental, par 1, on tro que les nombres relatifs de vibrations correspondant à ces n sont représentés par les fractions ci-après :

haque gamme les notes sont toutes des multiples, par les puis-
nces croissantes de 2, des notes de même nom dans la gamme
ndamentale.

235. Intervalles des notes, dièses et bémols. — Les fractions qui
ccupent la seconde ligne du tableau [A] ci-dessus ne représen-
nt pas seulement les nombres de vibrations relatifs par rapport
l'*ut* fondamental, mais les intervalles successifs des six dernières
otes par rapport à la première (232). Or, si l'on cherche les in-
rvalles entre les notes consécutives, on trouve :

[B]	Notes	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
	Nombres relatifs de vibrations	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
	Intervalles	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$.	

On voit que les intervalles différents entre les sept notes de la
mme se réduisent à trois, qui sont $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ et $\frac{16}{15}$. Le premier, qui
t le plus grand, s'appelle *ton majeur;* le second, *ton mineur,* et
troisième, qui est le plus petit, se nomme *semi-ton majeur.* De
, toutes les fois que l'intervalle entre deux sons est $\frac{9}{8}$ ou $\frac{10}{9}$, on
t qu'il y a entre eux un *ton;* et si l'intervalle est $\frac{16}{15}$, qu'il y a
n *demi-ton.* On peut donc dire que les intervalles successifs de
gamme *ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut,* comprennent deux tons,
n demi-ton, trois tons et un demi-ton.

L'intervalle entre le ton majeur et le ton mineur est $\frac{80}{81}$. C'est le
s petit intervalle que l'on considère; il faut une oreille exercée
r l'apprécier. On le désigne sous le nom de *comma.*

es intervalles de chaque note par rapport à l'*ut* fondamental
désignent sous les noms suivants :

L'intervalle de *ut* à
- *ré* $= \frac{9}{8}$ s'appelle une *seconde.*
- *mi* $= \frac{5}{4}$ . . . . . une *tierce.*
- *fa* $= \frac{4}{3}$ . . . . . une *quarte.*
- *sol* $= \frac{3}{2}$ . . . . . une *quinte.*
- *la* $= \frac{5}{3}$ . . . . . une *sixte.*
- *si* $= \frac{15}{8}$ . . . . . une *septième.*
- *ut* $= 2$ . . . . . une *octave.*

n déjà vu que plusieurs de ces intervalles donnent des ac-
consonnants (232); la *seconde* et la *septième,* exprimées
rapports compliqués, donnent des dissonances.

mme dont les rapports de vibrations viennent d'être indi-
t la *gamme diatonique;* la *gamme chromatique* est celle
ède par demi-tons; elle se compose de 13 sons.

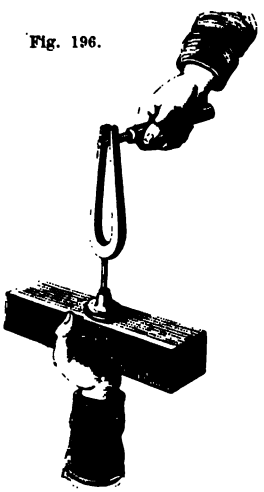
usiciens ont été conduits à intercaler entre les notes de la

gamme des notes intermédiaires qu'on désigne sous les noms de *dièses* et de *bémols*. *Diéser* une note, c'est augmenter le nombre de ses vibrations dans le rapport de 24 à 25; la *bémoliser*, c'est diminuer ce même nombre dans le rapport de 25 à 24.

236. **Accords parfaits.** — On donne le nom d'*accord parfait* à trois sons simultanés tels, que le premier et le second forment une tierce majeure, le second et le troisième une tierce mineure, le premier et le troisième une quinte; c'est-à-dire trois sons tels, que les nombres de vibrations qui leur correspondent soient entre eux comme 4, 5 et 6. Cette condition est remplie par les trois notes *ut, mi, sol*, dont les nombres de vibrations sont entre eux comme 1, $\frac{5}{4}$ et $\frac{3}{2}$, ou comme 4, 5 et 6. De tous les accords, c'est le plus agréable à l'oreille; c'est l'*accord parfait majeur*. Les trois sons 10, 12, 15, dont les intervalles $\frac{6}{5}$, $\frac{5}{4}$ et $\frac{3}{2}$ ne diffèrent des intervalles des précédents que par l'ordre des deux premiers, donnent l'*accord parfait mineur*.

237. **Diapason.** — Le *diapason* est un petit instrument à l'aide duquel on reproduit à volonté une note invariable, ce qui le rend propre à régler les instruments de musique. Il consiste en une verge d'acier recourbée sur elle-même en forme de pincette (fig. 196). On le fait vibrer, soit en passant un archet sur ses bords, soit en écartant brusquement ses deux branches au moyen d'un cylindre de fer qu'on passe de force entre elles, comme le montre la figure. Les deux lames, ainsi écartées de leur position d'équilibre, y reviennent en vibrant, et produisent un son constant pour chaque diapason. On renforce le son de cet appareil en le fixant sur une caisse de bois blanc ouverte à l'une de ses extrémités.

Fig. 196.



Le nombre de vibrations du diapason variant avec la longueur et l'épaisseur de ses deux branches, on le règle à l'aide de la sirène, ou mieux par le procédé graphique de Duhamel. Le nombre des vibrations simples du diapason a d'abord été de 856 par seconde; mais comme, pour régler le son de leurs instruments, les musiciens ne faisaient point usage de cet appareil, il est arrivé que le ton allait toujours en s'élevant sur tous les grands théâtres

d'Europe, et qu'en outre il n'était pas le même à Paris, à Vienne, à Milan, etc. Les constructeurs portèrent alors le nombre des vibrations du diapason à 880; enfin, en 1859, une commission choisie à cet effet adopta un *diapason normal*, obligatoire pour tous les établissements musicaux de France. Ce diapason, dont un étalon est déposé au Conservatoire de musique de Paris, donne 870 vibrations simples par seconde. On va voir ci-après quelle est la note correspondante à ce nombre.

238. **Notation des gammes, nombre absolu de vibrations.** — Le nombre absolu de vibrations qui correspond à l'*ut* fondamental étant tout à fait arbitraire, on peut admettre un nombre indéterminé de gammes. Comme point de départ pour toutes les autres, on a choisi celle dont l'*ut* correspond au son le plus grave de la basse, et l'on est convenu, en physique, de distinguer les notes de cette gamme en leur donnant l'indice $_1$; tandis qu'on donne aux gammes plus élevées les indices $_2$, $_3$..., et aux gammes plus graves, les indices $_{-1}$, $_{-2}$..., c'est-à-dire qu'on écrit ut_1, $ré_1$, ut_{-1}, $ré_{-1}$... Par exemple, fa_2 est à l'octave aiguë de fa_1.

On n'a considéré jusqu'ici que les nombres de vibrations relatifs; mais de ceux-ci il est facile de déduire les nombres absolus. En effet, le nombre 870 de vibrations simples, ou 435 de vibrations doubles, adopté ci-dessus pour le diapason, représente la_3. Par conséquent, les nombres de vibrations relatifs de *ut* et *la* étant 1 et $\frac{5}{3}$, si l'on représente par n le nombre de vibrations de ut_3, on doit avoir $n \times \frac{5}{3} = 435$; d'où $n = 261$ vibrations doubles. Ut_3 une fois connu, on aura les autres notes $ré_3$, mi_3, fa_3..., en multipliant 261 par $\frac{9}{8}$, par $\frac{5}{4}$, par $\frac{4}{3}$... (234, A). Quant à ut_2, il égale $\frac{ut_3}{2} = 130\frac{1}{2}$, et $ut_1 = \frac{ut_2}{2} = 65\frac{1}{4}$.

La valeur de ut_1 était anciennement 64; son accroissement résulte du plus grand nombre de vibrations attribué au diapason.

239. **Longueur des ondes.** — Lorsqu'on connaît le nombre de vibrations que fait un corps sonore par seconde, il est facile d'en déduire la longueur des ondes (206). On sait, en effet, qu'à 10 degrés le son parcourt 337 mètres par seconde; par conséquent, si un corps ne faisait qu'une vibration double par seconde, la longueur d'onde serait de 337 mètres; s'il en faisait deux, la longueur d'onde serait la moitié de 337 mètres; s'il en faisait trois, le tiers; et ainsi de suite. C'est-à-dire que *la longueur d'onde est le quotient de la vitesse du son divisée par le nombre de vibrations complètes*; et cela, quelle que soit la hauteur du son, puisque la vitesse est la même pour les sons graves ou aigus (209).

Si donc on représente la vitesse du son par v, la longueur d'onde par l, le nombre de vibrations par seconde par n, on aura $v = nl$; formule d'où l'on tire $n = \frac{v}{l}$: ce qui fait voir que le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur d'onde.

CHAPITRE IV

VIBRATIONS DES CORDES

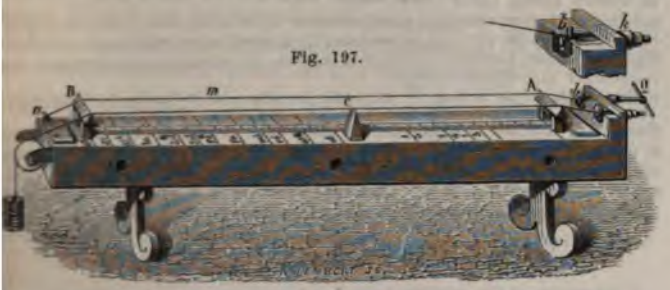
240. **Vibrations transversales des cordes.** — On nomme *cordes*, en acoustique, des corps filiformes, de métal ou de boyau, élastiques par tension.

On distingue, dans les cordes, deux sortes de vibrations, les unes *transversales*, ou dans une direction perpendiculaire aux cordes; les autres *longitudinales*, ou dans le sens de leur longueur. On excite les premières avec un archet, comme sur le violon, ou en pinçant les cordes, comme on le fait sur la harpe et la guitare. Quant aux vibrations longitudinales, on les fait naître en frottant les cordes, dans le sens de leur longueur, avec un morceau d'étoffe saupoudré de colophane.

241. **Sonomètre.** — Le *sonomètre* est un appareil qui sert à étudier les vibrations transversales des cordes. On l'appelle aussi *monocorde*, parce que souvent il ne porte qu'une seule corde. Cet appareil se compose d'une caisse de bois mince, destinée à renforcer le son; sur cette caisse sont deux chevalets fixes A et B (fig. 197), distants l'un de l'autre d'un mètre. D'un chevalet à l'autre est une échelle divisée en millimètres, et à gauche et à droite de cette échelle sont tracées sur la caisse deux séries de divisions, marquant, l'une la gamme vraie ou diatonique (235), l'autre la gamme *tempérée*, c'est-à-dire une gamme dans laquelle l'octave est partagée en douze intervalles rigoureusement égaux, qu'on nomme *demi-tons moyens*. Sur les chevalets passent deux cordes, l'une m, s'enroule d'un bout sur un boulon de fer a, qui est fixe, et de l'autre bout sur un boulon b, qui est lié à une vis horizontale, qu'on recule plus ou moins en faisant tourner un écrou k, dans lequel passe la vis, de manière à tendre la corde à volonté. La deuxième corde, fixée de la même manière à son extrémité n, passe à son autre extrémité sur une poulie. Là elle est tendue par des poids P, de plomb, qu'on augmente jusqu'à ce que la corde ait pris la tension voulue. Enfin, un chevalet mobile C peut se déplacer sous la corde pour en faire varier la longueur.

La première corde *m* est à son fixe; c'est-à-dire qu'on la tend jusqu'à lui faire rendre un son donné, auquel on compare ensuite les sons rendus par l'autre corde, à mesure qu'on la tend ou qu'on la raccourcit davantage. Ou bien les deux cordes passent chacune

Fig. 197.



sur une poulie, et alors elles sont tendues par des poids égaux, ou dans un rapport donné.

242. **Lois des vibrations transversales des cordes.** — Le calcul et l'expérience font voir que les vibrations transversales des cordes sont soumises aux lois suivantes :

1° *La tension d'une corde étant constante, le nombre des vibrations, dans le même temps, est en raison inverse de la longueur.*

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations est en raison inverse du rayon de la corde.*

3° *Le nombre des vibrations d'une corde est directement proportionnel à la racine carrée du poids qui la tend.*

4° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations d'une corde est inversement proportionnel à la racine carrée de sa densité.*

En musique, ces lois trouvent leur application dans les instruments à cordes, dans lesquels on faît varier la longueur, le diamètre, la tension et la nature des cordes, de manière à leur faire rendre telle ou telle note.

Ces lois sont comprises dans la formule $n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$, dans laquelle n représente le nombre de vibrations simples par seconde, l la *longueur* de la corde, c'est-à-dire la partie vibrante comprise entre les deux chevalets A et B (fig. 197), r le rayon de la section de la corde, P le poids qui la tend, et enfin d la densité de la corde, c'est-à-dire la masse sous l'unité de volume (44); quant à π, c'est le rapport de la circonférence au diamètre, lequel, comme on sait, est constant et égal à 3,141592.....

Dans cette formule P est compté en kilogrammes, r et l en décimètres.

Remarques sur la formule des vibrations des cordes. — On donne à la formule sur les vibrations transversales des cordes, tantôt la forme $n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$ [1] ci-dessus, tantôt la forme $n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$ [2]. Cette différence provient de ce que, dans la formule [2], d représente le poids spécifique de la corde, c'est-à-dire sa densité relative (45), tandis que dans la formule [1], la même lettre représente la densité absolue. En effet, Lagrange a donné la formule des vibrations transversales des cordes sous la forme $n = \sqrt{\frac{gP}{lp}}$ [3], dans laquelle n, P et l ayant la même signification que ci-dessus, g représente l'intensité de la pesanteur (62), et p le poids de la partie vibrante de la corde. Or, d'après la formule connue $P = VD$, on a $p = \pi r^2 ld$, d étant le poids spécifique de la corde, et $\pi r^2 l$, son volume, puisqu'elle n'est autre chose qu'un cylindre de rayon r et de hauteur l; portant cette valeur de p dans la formule de Lagrange, on trouve

$$n = \sqrt{\frac{gP}{\pi r^2 l^2 d}} = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}}.$$

Au contraire, si l'on représente par d la densité absolue de la corde, on aura, d'après la formule $P = VDg$ (45), $p = \pi r^2 lgd$, et portant encore cette valeur dans la formule de Lagrange, il vient $n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$, c'est-à-dire la formule [1] ci-dessus.

Tant que l'on ne considèrera que des nombres relatifs de vibrations, il sera plus simple de faire usage de la formule [1]; mais si l'on veut calculer le nombre absolu de vibrations que fait la corde par seconde, on devra avoir recours à la formule [2], en ayant soin de compter g en décimètres.

243. **Vérification des lois des vibrations transversales des cordes.** — *Loi des longueurs.* — Pour vérifier cette loi, rappelons que les nombres relatifs de vibrations des notes de la gamme sont

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Cela posé, si l'on fait vibrer la corde du sonomètre d'abord dans son entier, puis ensuite en lui donnant, à l'aide du chevalet mobile, les longueurs $\frac{8}{9}, \frac{4}{5}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{8}{15}$, et $\frac{1}{2}$, inverses des nombres ci-dessus, on obtient successivement toutes les notes de la gamme, ce qui prouve la première loi (242).

Loi des rayons. — On vérifie cette loi en tendant également sur le sonomètre deux cordes de même substance, dont les diamètres soient, par exemple, 3 et 2. Or, en les faisant vibrer, la deuxième donne la quinte de la première; ce qui fait voir qu'elle fait 3 vibrations pendant que la première en fait 2 (232).

Loi des tensions. — Ayant placé sur le sonomètre deux cordes identiques, on les tend par des poids qui soient entre eux comme 4 et 9. Or la deuxième donne encore la quinte de la première, d'où l'on conclut que leurs nombres de vibrations sont entre eux

comme 2 est à 3, c'est-à-dire comme les racines carrées des tensions. Si les deux poids étaient entre eux comme 16 et 25, on obtiendrait la tierce majeure, ou $\frac{5}{4}$.

Loi des densités. — On fixe sur le sonomètre deux cordes de même rayon, mais de densités différentes. Leur ayant donné la même tension, on promène sous la plus dense le chevalet mobile jusqu'à ce qu'elle soit à l'unisson avec l'autre corde : d, d' étant alors les densités des deux cordes, et l, l' les longueurs qui vibrent à l'unisson, on trouve $\frac{l}{l'} = \frac{\sqrt{d}}{\sqrt{d'}}$. Or, comme, d'après la première loi, on sait que $\frac{l}{l'} = \frac{n'}{n}$, on a $\frac{n'}{n} = \frac{\sqrt{d}}{\sqrt{d'}}$, égalité qui vérifie la loi.

244. Nœuds et lignes nodales, sons harmoniques des cordes. — Lorsqu'un corps vibre, non-seulement il vibre dans son ensem-

Fig. 198.

Fig. 199.

mais il se divise généralement en un certain nombre de parties aliquotes, dont chacune est animée de vibrations qui lui sont propres. Entre ces diverses parties, il existe des points et des lignes sensiblement fixes. Ce sont ces points et ces lignes qu'on désigne sous les noms de *nœuds* et de *lignes nodales*. Les parties comprises entre deux nœuds ou deux lignes nodales se nomment *concamérations*. Le milieu d'une concamération, là où les vibrations atteignent leur maximum d'amplitude, est un *ventre*. Parmi des vibrantes présentent des exemples curieux de nœuds et de ventres, quand on ne fait vibrer qu'une partie aliquote de la corde, c'est-à-dire un tiers, un quart, un cinquième. Pour cela, on fixe la corde à ses deux bouts, et l'on fait glisser dessous le chevalet, en l'arrêtant successivement au tiers, au quart, au cinquième de la corde. Le chevalet étant au tiers, comme le montre la figure 198, on fait vibrer la portion BD avec un

chet; l'autre portion AB se subdivise alors en deux parties AC et CB, qui vibrent séparément, le point C demeurant fixe. Cela se constate en plaçant de petits chevrons de papier, l'un en C, un autre entre B et C, un troisième entre C et A. Celui qui est en C n'éprouve qu'un léger ébranlement, tandis que les deux autres sont projetés au loin. Il y a donc un nœud dans le premier point, et des ventres dans les deux autres. Si le chevalet B est au quart de la corde, il se produit, entre A et B, deux nœuds et trois ventres (fig. 199); s'il est au cinquième, il se forme, entre les mêmes points, trois nœuds et quatre ventres, et ainsi de suite.

Lorsqu'une corde un peu longue vibre dans son entier, une oreille exercée distingue, outre le son fondamental, les *harmoniques* 2, 3, 4, 5; c'est-à-dire l'octave aiguë du son fondamental, la quinte de l'octave, la double octave et la tierce majeure.

Le même phénomène se produit dans tous les corps vibrants, ainsi qu'on le verra bientôt dans les tuyaux sonores (250).

245. Problèmes sur les vibrations transversales des cordes. — I. Une corde métallique fait 500 vibrations par seconde, sous la tension de 25 kilogrammes : combien en ferait-elle sous une tension de 49 kilogrammes?

Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations étant directement proportionnels aux racines carrées des poids qui tendent la corde (3e loi, 231), on a, en représentant par n le nombre de vibrations cherché,

$$\frac{n}{500}=\frac{\sqrt{49}}{\sqrt{25}},\quad \text{d'où}\quad n=\frac{500\times 7}{5}=700.$$

II. Une corde tendue par un poids de 15 kilogrammes rend un certain son; quelle devrait être la force de tension pour que la corde rendît la tierce majeure du son primitif? — On sait que la tierce majeure est représentée par $\frac{5}{4}$ quand le son primitif l'est par 1.

Les nombres de vibrations des deux sons étant entre eux comme 1 est à $\frac{5}{4}$, ou, ce qui est la même chose, comme 4 est à 5, si l'on représente par P le poids cherché, on a $\frac{4}{5}=\frac{\sqrt{15}}{\sqrt{P}}$, ou $\frac{16}{25}=\frac{15}{P}$; d'où $P=\frac{25\times 15}{16}=23^{k},437^{gr},5$.

III. Une corde de platine de $0^{mill},8$ de diamètre et une corde de fer de [illegible] étant tendues par des poids égaux, quelles doivent être leurs longueurs relatives pour qu'elles rendent deux sons à l'unisson? — On sait que le poids spécifique du platine est 23, et celui du fer 7,78.

Représentons par R, L, D, le rayon, la longueur et la densité de la corde de platine, par r, l, d, les mêmes quantités pour la corde de fer, et par P le poids qui les tend.

Les nombres de vibrations étant égaux, on a, d'après la formule $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$,

$$\frac{1}{RL}\sqrt{\frac{P}{\pi D}}=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}.$$

ou, en supprimant les facteurs communs

$$\frac{1}{RL}\cdot\frac{1}{\sqrt{D}}=\frac{1}{rl}\cdot\frac{1}{\sqrt{d}};\ \text{d'où}\ \frac{L}{l}=\frac{r}{R}\sqrt{\frac{d}{D}}.$$

Si l'on prend $l=1$, il vient $L=\frac{r}{R}\sqrt{\frac{d}{D}}=\frac{6,5}{4}\sqrt{\frac{7,78}{23}}=0,935.$

Les deux longueurs relatives sont donc 1 et 0,945.

IV. Calculer, à l'aide du sonomètre, le nombre de vibrations correspondant à un son donné.

Supposant que la corde du sonomètre rende un son moindre que *la* 3 du diapason (237), on la raccourcit au moyen du chevalet mobile, jusqu'à ce qu'elle rende cette note, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'elle fasse 870 vibrations simples par seconde. On mesure la longueur l de la partie vibrante; puis, avançant ou reculant le chevalet, on cherche la longueur que doit avoir la corde pour être à l'unisson du son donné : l' étant cette longueur, et n le nombre de vibrations correspondant, on a, d'après la loi des longueurs,

$$\frac{n}{870}=\frac{l}{l'},\ \text{d'où}\ n=\frac{870\,l}{l'}.$$

* **246. Vibrations longitudinales des cordes.** — On a déjà vu que, pour déterminer dans une corde tendue des vibrations longitudinales, on la frotte dans le sens de sa longueur avec un morceau de drap saupoudré de colophane (240).

On trouve par le calcul que les lois des vibrations longitudinales des cordes sont données par la formule $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gQ}{\pi d}}$, n, r, l, g et d ayant la même signification que dans la formule des vibrations transversales, et Q étant le *coefficient d'élasticité* de la corde. On nomme ainsi *le poids qui serait nécessaire pour donner à la corde une tension telle, qu'elle s'allongeât d'une quantité égale à elle-même;* allongement qui ne peut jamais se réaliser, la rupture ayant lieu bien auparavant.

De la formule ci-dessus on déduit quatre lois identiques avec celles déjà données pour les vibrations transversales.

CHAPITRE V

VIBRATION DE L'AIR DANS LES TUYAUX SONORES

247. Tuyaux sonores. — On nomme *tuyaux sonores* des tubes lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne qui y est renfermée. Dans les divers appareils décrits jusqu'ici, ı résulte des vibrations de corps solides; l'air n'en est que le ıle. Dans les instruments à vent, lorsque les tuyaux ont leurs suffisamment résistantes, c'est la colonne d'air renfermée ıs tuyaux qui seule est le corps sonore. On constate, en effet, matière des tuyaux est sans influence sur le son; il est le à dimensions égales, que les tuyaux soient de bois, de ıu de métal. Le timbre seul est modifié.

ı ne faisait que souffler dans les tuyaux, il n'y aurait pas nais seulement un mouvement progressif continu de l'air. un son se produise, il faut, par un moyen quelconque,

exciter dans l'air une succession rapide de condensations et de raréfactions, qui se propagent ensuite à toute la colonne d'air contenue dans le tuyau. De là, la nécessité de donner à l'*embouchure*, c'est-à-dire à l'extrémité du tuyau par laquelle arrive l'air, une forme convenable pour que celui-ci ne puisse entrer que par intermittences, et non d'une manière continue. D'après la disposition adoptée pour mettre ainsi l'air en vibration, les tuyaux sonores se divisent en *tuyaux à bouche* et en *tuyaux à anche*.

248. **Tuyaux à bouche.** — Dans les tuyaux à bouche, toutes les

Fig. 200. Fig. 201. Fig. 202. Fig. 203. Fig. 204.

parties de l'embouchure sont fixes. Ces tuyaux sont de bois ou de métal, prismatiques ou cylindriques, et toujours d'une grande longueur par rapport à leur diamètre. La figure 200 représente un tuyau à bouche, et la figure 201 en montre une coupe longit nale. Dans ce tuyau, la partie inférieure P, par laquelle ar l'air, est le *pied;* celui-ci sert à fixer le tuyau sur une souffl fig. 180). A sa sortie du pied, l'air passe dans une fente étroit

n fait arriver l'air. De là des pulsations qui se trans-
r dans le tuyau, et y font naître une suite de demi-
alternativement condensées et raréfiées (206). Ces
utant plus rapides, que la vitesse du courant est plus
e la lèvre supérieure est plus rapprochée de la lu-
que le son soit pur, il y a un certain rapport à éta-
dimensions des lèvres, l'ouverture de la bouche et
e la lumière. Enfin, le tuyau doit avoir une grande
rapport à son diamètre.

e traversière, l'embouchure consiste en une simple
rale et circulaire. C'est par la disposition qu'on donne
e le courant d'air vient se briser contre les bords de
e. Il en est de même dans la flûte de Pan et pour
avec laquelle on siffle.

2 représente l'embouchure d'un tuyau cylindrique fort
les jeux d'orgue, et la figure 203 en montre une coupe
Les mêmes lettres indiquent les mêmes pièces que
201. La figure 204 représente l'embouchure du sifflet
, laquelle a beaucoup de rapport avec les précédentes.

x à anche. — Dans ces tuyaux, la colonne d'air est
de de lames élastiques qu'on nomme *anches*, et qui
anche battante et en *anche libre*.

ante. — Cette anche se compose d'une pièce de
tal *a* (fig. 206), qu'on nomme la *rigole*, et qui est

de la rigole. En enfonçant plus ou moins la rasette, on raccourcit ou l'on allonge la partie vibrante de la languette, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer le nombre de ses vibrations.

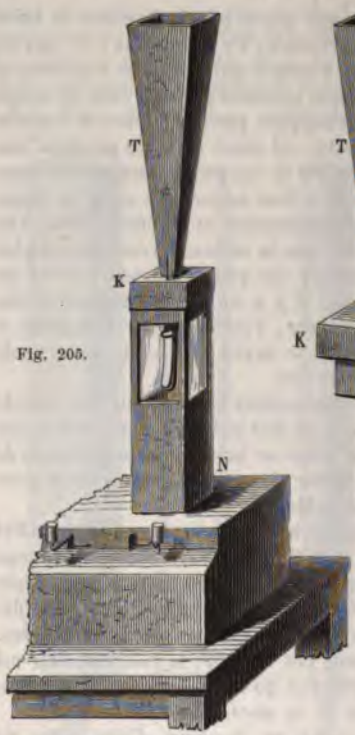


Fig. 205.

Fig. 206.

Fig. 207.

L'anche est adaptée au haut d'un tuyau rectangulaire KN, qui est le *porte-vent* (fig. 205). Ce tuyau est fixé sur le sommier d'une soufflerie. Dans les cours de physique, pour laisser voir les vibrations de la languette, les parois du porte-vent, dans la partie qui correspond à l'anche, sont de verre; c'est cette disposition qui est représentée dans la figure.

Lorsqu'on fait arriver l'air dans le porte-vent, il passe d'abord entre la languette et la rigole pour s'échapper par le tuyau T; puis, la vitesse du courant s'accélérant, la languette vient frapper les bords de la rigole, et, la fermant, le courant ne passe plus. Or, en vertu de son élasticité, la languette revient sur elle-même, puis est entraînée de nouveau aussitôt que le courant passe, et ainsi *de suite*, en sorte que, l'air ne passant que par intermittences du

porte-vent dans le tuyau T, il se produit dans celui-ci la même série de pulsations que dans les tuyaux à bouche; d'où résulte un son d'autant plus élevé, que le courant d'air est plus rapide.

Anche libre. — Grenié, en 1810, a inventé une espèce d'anche qu'on nomme *anche libre,* parce que la languette, au lieu de battre sur les bords de la rigole, entre dans la rigole en rasant ses bords de manière à osciller en dedans et en dehors. La rigole consiste ci en une petite caisse de bois *a* (fig. 207), dont la paroi antérieure est une plaque de laiton. Au milieu de celle-ci est une ouverture longitudinale dans l'intérieur de laquelle est la languette , qui peut s'infléchir librement en avant et en arrière pour livrer assage au courant d'air, qu'elle arrête chaque fois qu'elle rase s bords de la fente. Une rasette *r* sert encore à régler la longueur de la partie vibrante de la languette. L'anche étant placée ans le tuyau KN (fig. 205), lorsqu'un courant d'air arrive dans ui-ci, la languette se trouve comprimée, se courbe de dehors ı dedans, et livre passage à l'air qui s'échappe par le tuyau T. ais la languette, revenant sur elle-même en vertu de son élasticité, forme une suite d'oscillations qui font que la rigole est successivement ouverte et fermée, et que le courant d'air passe et 'arrête par intermittences comme avec les anches battantes.

250. Sons harmoniques rendus par un même tuyau. — Daniel ernoulli, célèbre géomètre de Groningue, mort en 1782, a le premier reconnu qu'un même tuyau peut successivement rendre des ons de plus en plus élevés lorsqu'on force le courant d'air qui le ait *parler*. Pour cela, on fait usage d'un long tube de verre fixé l'une des embouchures décrites ci-dessus (248), mais munie 'un robinet qui sert à régler le courant d'air (fig. 210). Ce tuyau ant fixé sur une soufflerie, en ménageant le vent, on lui fait d'abord rendre le son fondamental, c'est-à-dire le son le plus grave. uis, forçant le vent en ouvrant davantage le robinet et en appuyant avec la main sur la tige T de la soufflerie (fig. 180), on btient des sons de plus en plus élevés dans l'ordre suivant:

1° Si le tuyau est ouvert à son extrémité opposée à l'embouchure, et si l'on représente par 1 le son fondamental, les sons qui viennent après lui sont successivement 2, 3, 4, 5, 6, 7,... c'est-à-dire successivement tous les harmoniques du son fondamental.

2° Si le tuyau est fermé à l'extrémité opposée à l'embouchure, il ne rend que les sons 1, 3, 5, 7, 9,... c'est-à-dire seulement les harmoniques de rang impair.

Dans les deux cas, quelque tentative que l'on fasse, on ne peut tirer d'un même tuyau toutes les notes de l'échelle musicale, mais seulement les harmoniques du son fondamental.

251. Nœuds et ventres de vibration dans les tuyaux sonor
Les rapports des sons successifs rendus par un même tuyau s
indiquent que la colonne d'air contenue dans le tuyau se subd
en parties aliquotes de plus en plus courtes, vibrant à l'uni

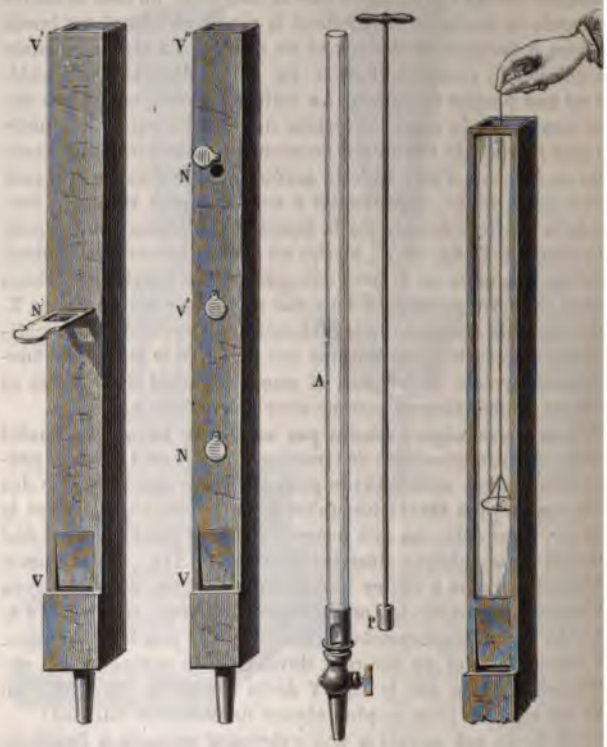


Fig. 208. Fig. 209. Fig. 210. Fig. 211.

En effet, la théorie et l'expérience font voir qu'il existe dans
colonne d'air, de distance en distance, des tranches fixes qui s
des *nœuds;* et qu'entre deux nœuds consécutifs il se rencon
toujours une section où l'air atteint un maximum de vibratio
c'est un *ventre.* Le caractère des nœuds, c'est que l'air n'y vi
pas, mais subit des variations continuelles de densité et de pr
sion; tandis que le caractère des ventres, c'est que l'air y vi
constamment sans changer de densité ni de pression.

ériences qui montrent les nœuds et les ventres. — Plu-
riences servent à constater l'existence des nœuds et
de vibration dans les tuyaux sonores.

le une membrane de baudruche sur un anneau de car-
é par trois fils comme un plateau de balance; puis,
du du sable sur la baudruche, on descend le tout len-
un tuyau pendant qu'il parle
r, de distance en distance, on
les grains de sable ne reçoivent
ement de la baudruche et res-
les : c'est là que sont les nœuds;
dans les positions intermé-
grains de sable sont projetés
ns vivement par les vibrations
brane reçoit de l'air.

Fig. 212.

nstate encore l'existence des
s ventres, en perçant, dans les
tuyau sonore, des trous qu'on
ou fermer à volonté à l'aide
s mobiles autour d'un axe
La densité de l'air, comme on
sus, étant constante et la même
ieur dans les parties corres-
ux ventres, lorsqu'on ouvre un
rd de ceux-ci, le son n'éprouve
ification. Au contraire, en re-
uds, où la densité de l'air est
s qu'un trou est ouvert, le son
ement changé; ce qui résulte
a tranche d'air intérieure, se
pression atmosphérique, prend
constante, et que, par suite, là où était un nœud, se
ntre.

enfonce lentement dans le tuyau A (fig. 210) un
à une longue tige, le son monte d'abord; mais, à me-
piston descend, on rencontre une ou plusieurs posi-
tuyau rend exactement le même son qu'avant l'intro-
piston. Or, la couche d'air en contact avec celui-ci
écessairement immobile, il fallait qu'elle le fût avant,
ntend le même son. Donc toutes les positions du pis-
produit le son primitif sont des nœuds. Si l'on arrête
tre deux nœuds, le son est changé, ce qui prouve que
'air maintenant immobile ne l'était pas d'abord.

4° Enfin, nous citerons encore l'expérience suivante, faite au moyen des flammes manométriques de Kœnig (228). Sur une des parois d'un tuyau rectangulaire est une chambre P, dans laquelle arrive du gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc S (fig. 212). De cette chambre partent trois tubes de caoutchouc *a*, *a*, *a*, qui conduisent le gaz à autant de capsules fixées dans la paroi antérieure du tuyau, et sur chacune desquelles est appliqué un bec de gaz. Les trois becs étant allumés, si l'on fait rendre d'abord au tuyau le son fondamental, les deux becs A et C brûlent avec calme, tandis que le bec B s'éteint. Or on va voir ci-après (fig. 216) qu'en B il y a un nœud, c'est-à-dire une tranche subissant constamment des variations de pression et de densité; ce sont ces variations qui, faisant vibrer la membrane de la capsule (228), sont cause que le bec s'éteint.

Si l'on recommence l'expérience en soufflant tout d'un coup avec force pour obtenir le son 2, ce n'est plus le bec B qui s'éteint, mais les deux becs A et C; c'est-à-dire qu'en B est un ventre, et en A et C des nœuds, comme le montre la figure 217 ci-après.

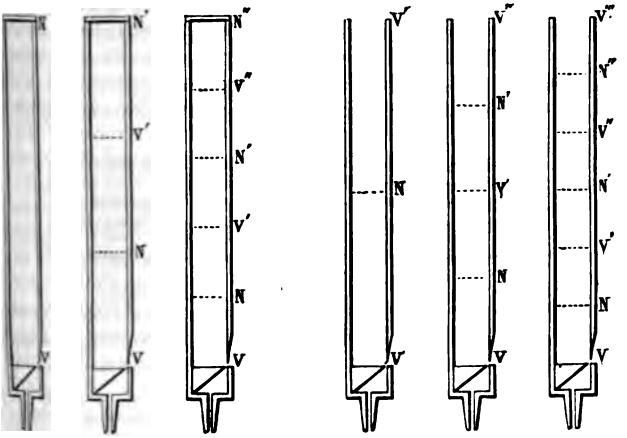
Dans toutes ces expériences, on constate que, dans un même tuyau, ouvert ou fermé, quel que soit le nombre des nœuds, ils sont toujours également distants entre eux, et que le milieu entre deux nœuds est toujours un ventre.

253. **Disposition des nœuds et des ventres.** — 1° *Tuyaux fermés.* — Dans ces tuyaux, auxquels les organistes donnent le nom de *bourdons*, le fond opposé à l'embouchure est toujours un nœud, puisque la couche d'air en contact avec lui est nécessairement immobile et ne subit que des variations de densité. A la bouche, au contraire, où l'air conserve une densité constante, celle de l'atmosphère, et où le mouvement vibratoire est maximum, se trouve toujours un ventre. Dans tout tuyau fermé, il y a donc au moins un nœud et un ventre (fig. 213); c'est alors que le tuyau rend le son fondamental, et la distance VN du ventre au nœud égale une demi-onde condensée ou raréfiée, ou, ce qui est la même chose, égale le quart de la longueur totale de l'onde complète (206).

A partir de là, si l'on force le vent, la bouche restant toujours un ventre et le fond un nœud, la colonne d'air se subdivise en trois parties égales (fig. 214), et il se produit un nœud et un ventre intermédiaires. Or, la distance VN entre un nœud et un ventre consécutifs étant toujours le quart de la longueur d'onde, celle-ci est devenue trois fois plus petite, et par suite le nombre des vibrations trois fois plus grand, puisque le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur d'onde (239). Donc, si l'on représente par 1 le son fondamental, on a actuellement le son 3. Pour le

n qui vient après, il y a deux nœuds et deux ventres entre le fond la bouche (fig. 215), et la distance VN étant cinq fois moindre, ı a le son 5, et ainsi de suite; ce qui montre comment les tuyaux rmés rendent successivement les sons 1, 3, 5, 7,... (250).

2° *Tuyaux ouverts aux deux bouts.* — Dans ces tuyaux, les



'g. 213. Fig. 214. Fig. 215. Fig. 216. Fig. 217. Fig. 218.

ranches d'air à la bouche et à l'extrémité opposée conservant nécessairement une densité constante, celle de l'atmosphère, il y a ujours un ventre à chaque extrémité et au moins un nœud entre s deux (fig. 216). On a alors le son fondamental, et la longueur 'onde complète, qui est toujours quatre fois la distance d'un nœud un ventre, est double de la longueur du tuyau.

Si l'on force le vent, il se produit deux nœuds et un ventre intermédiaires (fig. 217), et la longueur d'onde étant deux fois moin-e, on a le son 2. Puis la colonne d'air se subdivisant en trois uds et deux ventres intermédiaires (fig. 218), la longueur d'onde trois fois moindre, d'où résulte le son 3, et ainsi de suite. D'où ı voit comment les tuyaux ouverts rendent successivement tous sons 1, 2, 3, 4, 5...

254. **Origine des nœuds et des ventres dans les tuyaux.** — Dans tuyaux fermés, les nœuds et les ventres de vibration ont pour se la réflexion des ondes sonores sur le fond. Les ondes réflé-es croisent alors les ondes directes sans les altérer; mais ou ondes qui se rencontrent sont de même sens, et alors elles se erposent pour donner un maximum de vibration, c'est-à-dire

un ventre; ou elles sont de sens contraires, et c'est alors qu faisant équilibre, elles donnent naissance à un nœud.

Dans les tuyaux ouverts, c'est contre la masse d'air ind située à l'extérieur que les ondes sonores se réfléchissent.

Quant aux variations de densité et de pression qui se produ aux nœuds, elles résultent des condensations et des raréfa successives des ondes, en vertu desquelles les tranches d'ai prochent et s'éloignent alternativement des nœuds. Si les marchent les unes vers les autres, comme le montrent les fi dans la figure 219, il y a condensation; au contraire, lorsq

Fig. 219.

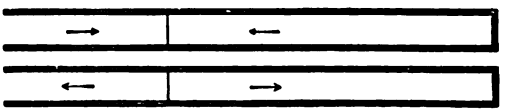


Fig. 220.

ondes s'éloignent (fig. 220), il y a dilatation; mais, dans les cas, les vitesses étant égales et de signes contraires, la ti de séparation, ou le nœud, est toujours immobile.

255. **Formule des tuyaux sonores.** — De ce qui précède, il découle colonne d'air, dans les tuyaux fermés, est toujours partagée par des n des ventres de vibration en un nombre impair de parties égales entre elles e au quart de la longueur d'onde complète (fig. 213, 214 et 215); et dans les ouverts, en un nombre pair (fig. 216, 217 et 218). Si donc on représente la lo du tuyau par L, par l la longueur de l'onde complète, et par p un nom tier quelconque, en sorte que $2p$ soit un nombre pair, et $2p+1$ un nom pair, on a pour les tuyaux fermés, $L=(2p+1)\frac{l}{4}$ [1]; et pour les tuyaux o

$L=2p\times\frac{l}{4}$, ou $L=p\times\frac{l}{2}$ [2].

En remplaçant dans les formules [1] et [2] l par sa valeur $\frac{v}{n}$ tirée de l tion $v=ln$ (239), v étant la vitesse du son dans l'air, et n le nombre de tions par seconde, il vient

$$L=(2p+1)\frac{v}{4n}, \quad \text{et} \quad L=p\frac{v}{2n}.$$

D'où l'on tire, pour les tuyaux fermés, $n=\frac{(2p+1)v}{4L}$ [3], et pour les tu ouverts $n=\frac{pv}{2L}$ [4].

Or si, dans la formule [3], on donne à p successivement les valeurs 0, 1, 2, on obtient $n=\frac{v}{4L}$, $3.\frac{v}{4L}$, $5.\frac{v}{4L}$, $7.\frac{v}{4L}$.....; c'est-à-dire que les tuyaux fe rendent le son fondamental $\frac{v}{4L}$, et tous ses harmoniques de rang impair qui est conforme à l'expérience (250).

Si, dans la formule [4], on donne à p les valeurs 1, 2, 3, 4, 5....., il vient $n = \frac{v}{2L}, 2.\frac{v}{2L}, 3.\frac{v}{2L}, 4.\frac{v}{2L}, 5.\frac{v}{2L}$.....; c'est-à-dire que les tuyaux ouverts rendent le son fondamental $\frac{v}{2L}$, et tous ses harmoniques, pairs et impairs.

256. **Loi des longueurs.** — Les formules [3] et [4] ci-dessus montrent que, dans les tuyaux ouverts, aussi bien que dans les tuyaux fermés, *le nombre de vibrations est en raison inverse de la longueur des tuyaux.* Cette loi, qui est connue sous le nom de *loi des longueurs*, se vérifie expérimentalement en faisant vibrer deux tuyaux de même espèce, l'un double de l'autre; on trouve que le plus court donne l'octave aiguë du plus long.

Enfin, si l'on compare le son fondamental d'un tuyau fermé à celui d'un tuyau ouvert de même longueur, les formules [3] et [4] ci-dessus font voir que le nombre des vibrations du tuyau ouvert est double, et par suite que *le son fondamental d'un tuyau ouvert est à l'octave aiguë de celui du tuyau fermé de même longueur;* ce qu'on peut encore exprimer, d'après la loi des longueurs, en disant que *le son fondamental rendu par un tuyau fermé est le même que celui rendu par un tuyau ouvert de longueur double.* On vérifie cette dernière loi au moyen d'un tuyau ouvert aux deux bouts, muni en son milieu d'un diaphragme à coulisse, percé d'une ouverture carrée égale à la section du tuyau (fig. 208). Quand le diaphragme est enfoncé, le tuyau est ouvert dans toute sa longueur; mais il est fermé en son milieu, lorsque le diaphragme est dans la position représentée par le dessin. Dans ce cas, on a le son fondamental d'un tuyau fermé de longueur VN. Puis, lorsque le diaphragme est rentré, on a le son fondamental d'un tuyau ouvert de longueur double VV'. Or, dans les deux cas, le son est le même.

257. **Lois de Bernoulli.** — En résumant ce qui précède sur les tuyaux sonores, on conclut les lois suivantes, connues sous le nom de *lois de Bernoulli*, qui, le premier, les a posées.

Lois des tuyaux fermés. — 1° Un tuyau fermé d'un bout et muni d'une embouchure à bouche ou à anche à l'autre bout, étant fixé sur la table d'une soufflerie, *rend des sons de plus en plus élevés à mesure qu'on force le vent; et si l'on représente par* 1 *le son le plus grave, ou le son fondamental, on trouve que le tuyau rend successivement les sons* 1, 3, 5, 7, 9,... *représentés par la série des nombres impairs.*

2° *Pour les tuyaux inégaux, les sons de même ordre correspondent à des nombres de vibrations qui sont en raison inverse des longueurs des tuyaux.*

3° *Les vibrations de l'air, dans les tuyaux, sont longitudi-*

nales, et la colonne d'air vibrante est partagée en parties égales ***par des nœuds et des ventres, le fond des tuyaux étant toujours un nœud et l'embouchure un ventre.***

4° ***Les nœuds, ou les surfaces de séparation des parties vibrantes, sont immobiles et n'éprouvent que des changements de densité, tandis que les ventres, ou les milieux des parties vibrantes, conservent la même densité, mais vibrent constamment.***

5° ***Dans le cas d'un seul nœud, le tuyau rend le son fondamental, et la longueur de l'onde complète égale quatre fois celle du tuyau.***

Lois des tuyaux ouverts. — Les lois des tuyaux ouverts aux deux bouts ne diffèrent des lois précédentes qu'en ce que ***les sons rendus par un même tuyau sont successivement représentés par la suite naturelle des nombres*** 1, 2, 3, 4, 5, 6,... et qu'en ce que ***les extrémités des tuyaux sont toujours des ventres.***

De plus, ***le son fondamental d'un tuyau ouvert par les deux bouts est toujours l'octave aiguë du même son dans un tuyau de même longueur ouvert par un seul. Enfin, la longueur d'onde égale deux fois celle du tuyau.***

258. **Les lois de Bernoulli ne sont qu'approchées.** — Les lois de Bernoulli ne se vérifient pas rigoureusement par l'expérience. Que les tuyaux soient à bouche ou à anche, on obtient des sons plus graves que ne l'indique la théorie. De plus la distance du premier nœud à l'embouchure est toujours moindre que la distance théorique; au contraire, dans les tuyaux fermés, la distance du fond au premier ventre est plus grande que celle donnée par les lois de Bernoulli.

259. **Problèmes sur les tuyaux sonores.** — I. Un tuyau ouvert donnant pour troisième harmonique *rés*, quelle est la longueur de ce tuyau en mètres, la température de l'air étant de 10 degrés?

On sait que la_3 correspond à 435 vibrations doubles par seconde (238), et que le rapport de *ut* à *la* est 1 à $\frac{5}{3}$; on a donc $ut_3 \times \frac{5}{3} = 435$, d'où $ut_3 = 261$.

Ut_3 une fois connu, on en déduit *rés* en multipliant 261 par $\frac{9}{8}$, qui représente le nombre relatif de vibrations de *ré* par rapport à *ut* (234); donc

$$rés = 261 \times \frac{9}{8} = 293\frac{5}{8}.$$

Cela posé, on sait que dans les tuyaux ouverts on a la relation $n = p.\frac{v}{2L}$ (255), n étant le nombre des ondes sonores complètes par seconde; v la vitesse du son dans l'air, laquelle à 10 degrés est de 337 mètres; L la longueur du tuyau de la bouche à l'extrémité, et p un nombre entier quelconque.

Faisant $p = 4$ pour avoir le son 4, ou le troisième harmonique, il vient

$$n = \frac{4v}{2L}, \text{ d'où } L = \frac{2v}{n} = \frac{2.337}{293 + \frac{5}{8}} = 2^m,295.$$

son fondamental étant 1, la quinte majeure est $\frac{3}{2}$ (232), c'est-
ux sons qui donnent la quinte sont entre eux comme 2 est à 3.
le son donné étant 100, le son cherché est 150.

rmule des tuyaux ouverts étant $L = p.\frac{v}{2n}$ (255), si l'on y fait
), pour le son fondamental, $L = \frac{v}{2n}$; d'où l'on déduit, pour le
$= \frac{v'}{200}$, et pour le second, $L = \frac{v''}{300}$, v' étant la vitesse du son à
a vitesse à $t°$. De ces deux égalités on tire $\frac{v'}{200} = \frac{v''}{300}$. Or on
$' = v\sqrt{1+10\alpha}$, et $v'' = v\sqrt{1+\alpha t}$. On a donc

$$\frac{\sqrt{1+10\alpha}}{200} = \frac{v\sqrt{1+\alpha t}}{300}, \text{ ou } \frac{1}{2}\sqrt{1+10\alpha} = \frac{1}{3}\sqrt{1+\alpha t};$$

rré et réduisant, on a enfin

$$9(1+10\alpha) = 4(1+\alpha t), \text{ ou } 5+90\alpha = 4\alpha t;$$

rnière équation par rapport à t, et remplaçant α par sa va-
), on trouve $t = 363°$.

ouvert et un bourdon (tuyau fermé) ont une longueur com-
s; on demande 1° quel est le rapport musical qui existe entre
oniques de ces tuyaux; 2° quel est le nombre absolu de vibra-
rise l'un ou l'autre de ces tuyaux. — La température est de
ficient de dilatation de l'air 0,00367, et la vitesse du son dans
ètres.

le son fondamental étant 1, le tuyau ouvert rend les harmo-
, 6,... et le tuyau fermé les harmoniques 3, 5, 7,... (250). Les
nes que l'on compare sont donc 3 et 5; mais comme, dans les
un harmonique quelconque est à l'octave aiguë de l'harmo-

il vient $n = \frac{3v\sqrt{1+\alpha t}}{2L}$; ou, remplaçant v, t, L par les valeurs données dans l'énoncé, $n = \frac{3.333\sqrt{1+0,00367\times 20}}{4} = 258,7$.

Si l'on voulait calculer le nombre absolu des vibrations du deuxième son, on prendrait la formule $n' = \frac{(2p+1)v'}{4L}$; en y faisant $p = 2$ pour avoir le deuxième harmonique, on trouve

$$n' = \frac{5v\sqrt{1+\alpha t}}{4L} = \frac{5.333\sqrt{1+0,00367\times 20}}{8} = 215,6.$$

Si l'on prend le rapport des deux nombres 258,7 et 215,6, on vérifie qu'il est $\frac{6}{5}$.

---

* CHAPITRE VI

VIBRATIONS DES VERGES, DES LAMES, DES PLAQUES ET DES MEMBRANES

260. **Vibrations des verges et des lames.** — Les verges et les lames minces, de bois, de verre, de métal, et surtout d'acier trempé, vibrent en vertu de leur élasticité, et présentent, comme les cordes, deux sortes de vibrations, les unes transversales, les autres longitudinales. On fait naître les premières en fixant les verges et les lames par un bout, et en passant un archet sur la partie libre. On produit les vibrations longitudinales dans une verge en la fixant en l'un de ses points, et en la frottant, dans le sens de sa longueur, avec un morceau de drap mouillé ou saupoudré de colophane. Toutefois, dans ce dernier cas, on n'obtient un son qu'autant que le point de la verge qu'on a fixé en marque la moitié, le tiers, le quart, en un mot, une partie aliquote.

On démontre, par le calcul, que *le nombre des vibrations transversales des verges et des lames de même nature est en raison directe de leur épaisseur et en raison inverse du carré de leur longueur.* La largeur des lames n'a pas d'influence sur le nombre des vibrations qu'elles peuvent rendre; elle fait seulement varier la force nécessaire pour les ébranler.

Dans les verges élastiques de même nature, *le nombre des vibrations longitudinales est en raison inverse de leur longueur, quels que soient leur diamètre et la forme de leur section transversale.*

261. **Vibrations des plaques.** — Lorsqu'on veut mettre une plaque en vibration, on la fixe par son centre (fig. 221), et on l'ébranle sur ses bords au moyen d'un archet; ou bien on la fixe par quelque point de sa surface, et on l'ébranle à son centre, percé, pour cela, d'une ouverture dans laquelle on détermine un frottement à l'aide de crins enduits de colophane (fig. 222).

Les plaques qu'on fait vibrer présentent des lignes nodales (244) qui varient par leur nombre et leur position, selon la forme des plaques, leur élasticité, le mode d'ébranlement et le nombre des vibrations. On rend les lignes nodales apparentes en recouvrant les plaques d'une légère couche de sable avant de les faire vibrer. Aussitôt que les vibrations commencent, le sable abandonne les parties vibrantes, et vient se déposer sur les lignes nodales (fig. 221 et 222).

On détermine la position des lignes nodales à volonté, en touchant les parties où l'on désire qu'elles se produisent. Le nombre de ces lignes est généralement d'autant plus considérable, que le nombre des vibrations est plus grand, c'est-à-dire que le son rendu par les plaques est plus haut. Les lignes nodales

présentent toujours une grande symétrie de forme, et pour une même plaque ébranlée dans les mêmes conditions, elles se produisent identiquement. C'est Chladni qui a fait connaître le phénomène des lignes nodales dans les plaques.

Les vibrations des plaques sont soumises aux lois suivantes : *Pour des plaques*

Fig. 221.

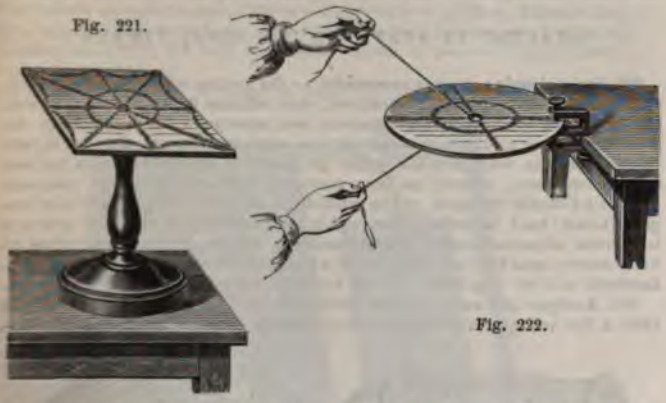


Fig. 222.

de même nature, de même forme, donnant les mêmes figures, le nombre des vibrations est en raison directe des épaisseurs des plaques, et en raison inverse de leurs surfaces.

262. **Vibrations des membranes.** — La flexibilité des membranes ne leur permet pas de vibrer, si elles ne sont tendues comme la peau d'un tambour. Elles rendent alors un son d'autant plus élevé, qu'elles sont de plus petite dimension et plus fortement tendues. Pour obtenir des membranes vibrantes, Savart collait, sur des cadres de bois, de la baudruche très-flexible.

Les membranes peuvent vibrer par percussion, comme dans le tambour, ou

Fig. 223.

par influence. En effet, Savart a observé qu'une membrane peut vibrer sous l'influence des vibrations de l'air, quel que soit le nombre de ces vibrations, pourvu qu'elles soient assez intenses. La figure 223 représente une membrane vibrant sous l'influence des vibrations qu'imprime à l'air un timbre sonore. Du sable fin répandu sur la membrane montre la formation des nœuds et des ventres, de même que sur les plaques.

* CHAPITRE VII

ANALYSE ET SYNTHÈSE DES SONS, TIMBRE

263. **Sons simples et sons composés.** — On nomme sons *simples* ceux produits par une seule espèce de vibrations, sans mélange d'harmoniques, et sons *composés* ceux qui résultent de plusieurs sons superposés. On peut obtenir des sons simples avec un diapason monté sur une caisse renforçante, avec les tuyaux fermés, avec la voix humaine quand on chante la syllabe *ou;* mais les sons simples sont rares, et ceux que nous percevons habituellement sont composés.

Avec les cordes vibrantes, qui se subdivisent en parties aliquotes de leur longueur totale (244), la corde entière rend le son fondamental, ou le plus grave, et les parties aliquotes donnent ses harmoniques. Le son composé ainsi formé est harmonieux; mais tout son composé qui ne résulte pas de la réunion du son fondamental et d'un ou plusieurs de ses harmoniques est discordant.

264. **Analyse des sons par les résonnateurs.** — C'est Helmholtz qui, en 1863, a fait voir que la plupart des sons regardés comme simples sont composés.

Fig. 224.

Fig. 225.

Sa méthode est fondée sur la résonnance, c'est-à-dire sur la propriété qu'ont les caisses sonores, quand elles sont de dimensions convenables, de vibrer spontanément à l'unisson d'un son donné, et de le renforcer (207,5°). Les caisses de Helmholtz sont des globes creux, de laiton, dont les dimensions varient de manière à ce qu'ils puissent renforcer toutes les notes de la gamme et leurs harmoniques. Ces globes, qu'on nomme *résonnateurs*, sont percés aux deux extrémités d'un même diamètre, de deux trous circulaires (fig. 225); à l'un est fixée une tubulure cylindrique *a*, à l'autre une tubulure conique *b*. La hauteur du son avec lequel s'accorde un résonnateur dépend de ses dimensions et de la grandeur de l'ouverture *a*. C'est celle qui reçoit le son, tandis que le cône *b* est introduit dans une oreille, pendant qu'on a soin de boucher l'autre. En expérimentant ainsi, l'oreille est sourde pour tout autre son que celui pour lequel le résonnateur est accordé; mais aussitôt que ce son est produit, quoique faible et mélangé avec d'autres, l'oreille le perçoit distinctement. De là un procédé très-sensible pour reconnaître un son parmi un grand nombre d'autres. C'est avec des résonnateurs diversement accordés que Helmholtz a décomposé les sons des différents instruments de musique, de la voix humaine et même des bruits.

Kœnig a modifié le résonnateur de Helmholtz en lui donnant la disposition représentée dans la figure 224. Ici, le résonnateur est cylindrique et à tirage; l'extrémité qui reçoit le son pouvant se tirer plus ou moins, de manière à faire

arier le volume à volonté. Le son devenant alors de plus en plus grave, un même résonnateur peut correspondre successivement à plusieurs notes. Sur l'extrémité conique s'applique un tuyau de caoutchouc qui sert à conduire les vibrations de l'air, du résonnateur à des flammes manométriques.

265. **Appareil de Kœnig pour l'analyse des sons.** — L'application successive à l'oreille de résonnateurs différents étant lente et pénible, Kœnig a imaginé un appareil dans lequel une série de résonnateurs agissant sur des flammes manométriques (228), les sons deviennent visibles et peuvent être montrés à un nombreux auditoire.

Cet appareil consiste en un châssis de fonte XY (fig. 226) sur lequel sont fixés,

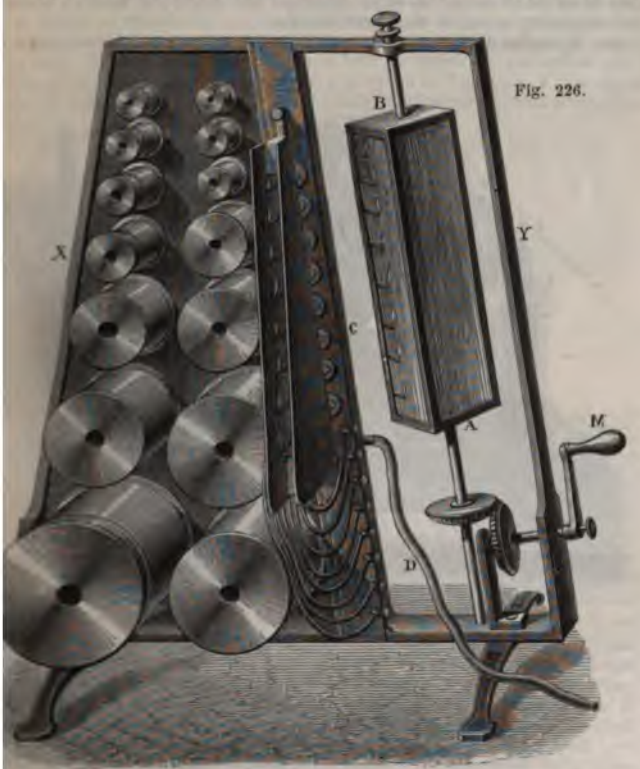


Fig. 226.

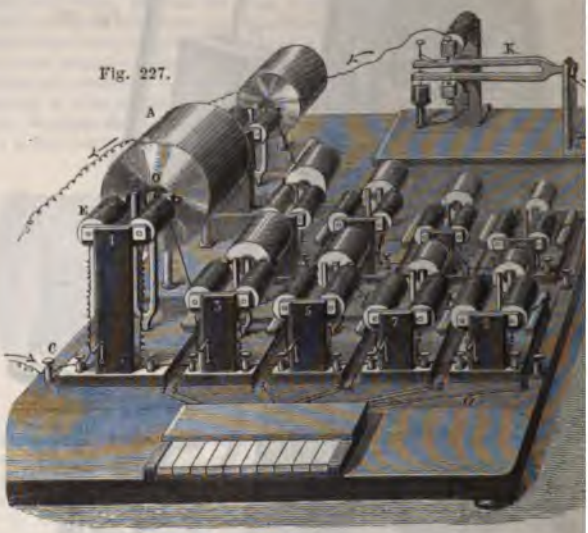
deux séries parallèles, quatorze résonnateurs accordés pour donner toutes les notes de fa_1 à ut_5, c'est-à-dire quatre octaves et demie, notes dont les plus élevées donnent les harmoniques inférieurs des premières. A droite des résonnateurs une chambre C, qui reçoit le gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc D, sur laquelle sont montés huit becs munis chacun d'une capsule manométrique

(228). Chaque bec est en communication avec la chambre C par un tu caoutchouc spécial, tandis que, derrière l'appareil, d'autres tuyaux relient bec à un des résonnateurs. Enfin, à droite des becs est un système de tournants AB, identique avec celui déjà décrit (fig. 191).

Ces détails connus, soient le plus grand résonnateur à gauche accor résonner avec le son 1, sept autres avec les harmoniques de ce son, et huit en communication chacun avec un bec de gaz. Qu'on produise alors devant l'appareil : si ce son est simple, le résonnateur inférieur parle se flamme correspondante est seule dentelée ; mais si le son fondamental est pagné d'un ou de plusieurs de ses harmoniques, les résonnateurs cons parlent en même temps, ce qu'on reconnaît aux dentelures de leurs f Le son produit se trouve donc ainsi analysé.

266. **Synthèse des sons.** — Helmholtz ne s'est pas borné à décomp

Fig. 227.



sons ; il a vérifié les résultats de son analyse par la synthèse, c'est-à-dire reproduit un son donné, par la réunion des sons simples que lui avaie qués ses résonnateurs. L'appareil qu'il a adopté pour cette synthèse se c de onze diapasons, dont le premier rend le son fondamental de 258 vib simples, ou ut_2, neuf autres ses harmoniques, et le onzième sert d'inter pour faire vibrer les diapasons au moyen d'électro-aimants (296). Chaq pason a son électro-aimant spécial, et, de plus, un résonnateur qui le r

Tous ces diapasons et leurs accessoires sont disposés en deux rang rallèles de cinq (fig. 227), la première comprenant le son fondamental harmoniques impairs 3, 5, 7 et 9, la deuxième les harmoniques pairs 2 8 et 10 ; au delà est le diapason interrupteur K fixé horizontalement. ses branches est armée latéralement d'un fil de platine dont la point sans y plonger, la surface d'un bain de mercure contenu dans un petit

fond métallique est en communication par un fil de cuivre avec un élec-
ant placé en face du diapason.
areil ainsi disposé, un courant électrique (297), entrant par la borne c,
ans l'électro-aimant E, de là dans ceux des neuf diapasons suivants,
ive au diapason K lui-même. Là, le courant se trouve arrêté tant que le
a ne vibre pas, parce qu'alors le fil de platine ne plonge pas dans le
; mais si l'on fait vibrer le diapason en passant dessus un archet, à
vibration la pointe plonge, le courant passe dans le mercure, de là à
-aimant, d'où il retourne enfin à la pile. Les branches du diapason reve-
sitôt sur elles-mêmes en vertu de leur élasticité, et la pointe de platine
du mercure, le courant s'interrompt, et ainsi de suite à chaque vibra-
ible du diapason K. Or ces intermittences du courant se transmettant à
autres électro-aimants, ceux-ci sont alternativement actifs et inactifs.
e, ils tendent à communiquer à tous les diapasons, par attraction, le
ombre de vibrations. C'est ce qui a lieu pour le diapason 1, à l'unisson du-
réglé le diapason interrupteur; mais le diapason 3, étant accordé pour

Fig. 228.

bre de vibrations trois fois plus grand, fait 3 vibrations doubles à
ruption du courant, c'est-à-dire qu'il ne reçoit l'action attractive
-aimant qu'à chaque troisième vibration; de même le diapason 5
nouvelle impulsion qu'après 5 de ses vibrations; et ainsi de suite.
connus, voici comment on fait fonctionner l'appareil. Le résonna-
diapason est fermé par un clapet O (fig. 228) qui le rend sourd,
sons rendus par les diapasons sont à peine perceptibles tant que
abaissés; mais chacun de ceux-ci est fixé à l'extrémité d'un
nt le plus petit bras est sollicité par un cordon a, qui se rend
hes d'un clavier placé sur le devant de l'appareil (fig. 227). Lors-
la touche qui lui correspond, le cordon entraîne le levier, et,
vant, le résonnateur parle et renforce son diapason. On peut
t sur telles ou telles touches, ajouter au son fondamental ceux
iers harmoniques que l'on veut, et reproduire ainsi les sons
ait connaître la composition. Par exemple, en appuyant sur
à la fois, tous les résonnateurs parlent, et on obtient le son
à l'unisson du diapason le plus grave (253, 2°). Si l'on n'appuie

que sur la touche du son fondamental et sur celles de ses harmoniques impairs, on a le son d'un tuyau fermé (253, 1°).

267. **Cause du timbre.** — On a vu (229) que le timbre est cette qualité par-

Fig. 229.

Fig. 230.

ticulière du son qui fait que deux sons de même hauteur et de même intensité se distinguent cependant très-bien l'un de l'autre. On avait ignoré jusqu'ici la

Fig. 231.

Fig. 232.

véritable cause du timbre; mais les travaux de Helmholtz sur l'analyse et la synthèse des sons, font voir que le timbre particulier à chaque son est dû au cortége des harmoniques qui l'accompagnent.

[redacted]

instruments de musique ne sont pas également riches en harmoniques. es sont la voix humaine, les cordes et les tuyaux sonores; les mem-es, les verges, les diapasons sont pauvres. Dans une corde vibrante, xercée reconnaît très-bien le son fondamental et ses premiers har-

d visible le timbre des voyelles au moyen de son appareil à flammes es décrit plus haut (fig. 191). En chantant dans l'embouchure la r ut_1 puis sur ut_2, on obtient dans le miroir tournant les flammes résentées dans les figures 229 et 230; et si l'on chante sur les mêmes ille O, on a les figures 231 et 232.

ption des sons. — Sans donner ici la description de l'oreille, qui ne de la physiologie, voici comment Helmholtz explique la per-ons les plus compliqués. M. de Corti ayant fait voir que la mem-ure du limaçon, dans l'oreille interne, est tapissée d'environ 3 000 pe-qui sont les terminaisons des filaments du nerf acoustique, Helmholtz que fibre, accordée, comme un petit résonnateur, pour une note par-vibre qu'à l'unisson de cette note, et est sourde pour toutes les e son simple ne fait donc vibrer qu'une seule fibre, tandis que les s en font vibrer plusieurs. Cette décomposition des sons par les *fibres* que comment l'oreille peut distinguer un son entre plusieurs autres.

LIVRE VI

CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS PRÉLIMINAIRES; THERMOMÈTRES

269. **Chaleur, hypothèse sur sa nature, théorie dynamique.** *chaleur* est la cause qui, suivant son plus ou moins d'éne fait naître en nous l'impression du chaud ou du froid; mais cause a des effets plus variés et plus puissants : c'est elle qu fondre la glace, bouillir l'eau, rougir le fer.

De nombreuses hypothèses ont été émises sur la cause chaleur; deux surtout ont été soutenues par les physiciens : l tème de l'*émission*, et celui des *ondulations*.

Dans le premier système, on a longtemps expliqué les p mènes de la chaleur par l'hypothèse d'un fluide matériel, i dérable, incoercible, qu'on nommait *calorique*. Dans cette thèse, les atomes du calorique, dans un état constant de répu sont projetés dans toutes les directions et à toutes les dist s'emmagasinant en quantité variable dans les corps, et s'opp au contact immédiat de leurs molécules.

Cette hypothèse de la matérialité de la cause de la chaleur tenue par les savants les plus illustres, les Newton, les Lav les Laplace, les Gay-Lussac, est abandonnée aujourd'hui, physiciens les plus éminents de notre époque sont d'accord la remplacer par l'hypothèse des ondulations, suivant laque dernières molécules des corps sont animées d'un mouvemen petit, mais très-rapide, qui est cause de la chaleur, et qui est mis à distance par l'intermédiaire d'un milieu presque infin élastique, l'*éther* (8). Celui-ci, répandu dans tout l'unive remplissant les espaces intermoléculaires aussi bien que l paces interplanétaires, est choqué par les molécules des cor ce choc fait naître dans l'éther des ondulations qui transmett mouvement et par suite la chaleur, de même que les ondes res de l'air propagent le son. En sorte que dans la théorie d dulations, ou *théorie dynamique*, ou *thermodynamique*, les phénomènes calorifiques sont ramenés à une cause uniqu mouvement : les corps les plus chauds étant ceux dont les r

ribrent avec la plus grande vitesse et la plus grande ampli-
et les corps qui s'échauffent ou se refroidissent ne faisant
gner ou perdre du mouvement.

t en adoptant la théorie dynamique pour expliquer les phé-
es de la chaleur, on a conservé le langage usité dans la
e de l'émission, et l'on dit encore, d'un corps qui s'échauffe
refroidit, qu'il gagne ou perd de la chaleur; mais en réalité
t entendre par là que ses molécules reçoivent ou cèdent du
ment. En un mot, tous les phénomènes de la chaleur doi-
'expliquer par une communication ou par une transformation
uvement.

Travail interne et travail externe de la chaleur. — Dans la
dynamique, les molécules des corps possédant toujours
taine quantité de force vive, quand celle-ci se commu-
à un autre corps, elle se partage en deux parties : l'une qui
le le corps en augmentant la vitesse et l'amplitude des vi-
s moléculaires; l'autre qui disparaît en tant que chaleur
le et n'échauffe pas le corps, mais le *dilate*, c'est-à-dire
ses molécules. Celles-ci se déplaçant alors, et exerçant un
pable de vaincre les forces qui les lient, il y a un véri-
vail produit, dans le sens qu'on attache à ce mot en mé-
(30). Or ce travail se divise lui-même en travail *interne*
ail *externe*.

ail interne est celui qui est consommé pour vaincre les
éléculaires qui unissent les dernières particules des corps.
l est très-grand dans les solides, faible dans les liquides,
ble dans les gaz.

ail externe est celui qui consiste à surmonter les résis-
térieures qui s'exercent sur les corps. Par exemple, pour
, tout corps doit surmonter la pression atmosphérique
prime en tous sens.

né, le mouvement calorifique communiqué à un corps
lonc : 1° en échauffement, ou en chaleur sensible au
e; c'est de la chaleur communiquée; 2° en travail in-
artement des molécules; c'est de la chaleur transfor-
ible au thermomètre; 3° en travail externe, ou action
tances extérieures; c'est encore de la chaleur trans-

le chaleur qui produit l'échauffement persiste à l'état
moléculaire. Quant à celle qui disparaît pour pro-
il tant interne qu'externe, rigoureusement elle n'est
mais *transformée* en travail; car tout mouvement
ble, et ne peut que se modifier, ou se communi-

quer d'un corps à un autre. Dans tous les cas, la chaleur ainsi transformée en travail est soumise au principe général de la conservation des forces vives (39), c'est-à-dire que *le travail engendré est toujours la moitié de la force vive disparue.*

271. **Historique de la théorie dynamique de la chaleur.** — La théorie que la chaleur a pour origine un mouvement primordial des molécules de la matière n'est pas nouvelle. Déjà Newton, quoique ayant adopté la théorie de l'émission, avait dit que la chaleur consiste en un mouvement dans les corps. Rumford et Montgolfier développèrent cette théorie, et reconnurent que non-seulement le mouvement se transforme en chaleur, mais la chaleur en mouvement. En 1839, M. Seguin, dans un ouvrage sur l'influence des chemins de fer, soutenait que la force mécanique développée pendant le refroidissement d'un gaz ou d'une vapeur est la mesure et la représentation de la chaleur perdue. En 1842, le docteur Mayer, à Heilbronn, formulait, le premier, le rapport qui lie entre eux un certain travail mécanique et la chaleur nécessaire pour le produire; mais c'est M. Joule, professeur à Manchester, qui, le premier, en 1843, détermina l'*équivalent mécanique* de la chaleur (405), c'est-à-dire le rapport entre la quantité de chaleur dépensée et le travail mécanique produit, et réciproquement. Il établit ainsi définitivement la nouvelle théorie, en faisant voir qu'elle était plus qu'une hypothèse. En effet, c'est aujourd'hui un fait acquis à la science que, soit dans les machines, soit dans les phénomènes physiques, soit même dans l'économie animale, toute quantité de force vive qui disparaît comme chaleur est reproduite en travail mécanique, et réciproquement.

Après Mayer et Joule, les savants qui, par leurs travaux, leurs écrits et leur enseignement, ont le plus contribué à l'adoption de la théorie dynamique de la chaleur, sont MM. Colding, à Copenhague; Clausius, à Zurich; Maxwell, Rankine, à Glascow; W. Thompson, à Édimbourg; Tyndal, à Londres; Hirn, à Colmar; Dupré, à Rennes; Cazin, à Versailles; Regnault et Verdet, à Paris. Le livre qui a le plus popularisé la théorie mécanique est : *La chaleur considérée comme un mode de mouvement*, par Tyndall.

272. **Effets divers de la chaleur sur les corps.** — 1° Le mouvement moléculaire qui constitue la chaleur a pour premier effet, ainsi qu'on l'a déjà vu ci-dessus, d'écarter les molécules des corps, c'est-à-dire de les *dilater*. 2° La force vive que possèdent les molécules augmentant, les corps *changent d'état*, c'est-à-dire passent de l'état solide à l'état liquide, et de celui-ci à l'état fluide aériforme. 3° Enfin, la force vive continuant à croître, les corps sont *dissociés*, c'est-à-dire que, leurs éléments n'obéissent plus à aucune affinité, il y a décomposition (407).

Nous traiterons d'abord de la dilatation et de la contraction, forces qui sont énormes; car il faudrait une force mécanique extraordinaire presque incroyable pour augmenter ou réduire le volume des corps dans la même proportion.

Tous les corps se dilatent par l'effet de la chaleur. Les plus dilatables sont les gaz, après eux les liquides, et ensuite les solides. Dans ces derniers, on distingue la *dilatation linéaire*, c'est-à-dire suivant une seule dimension, et la *dilatation cubique*, c'est-à-dire en volume. Toutefois ces dilatations n'ont jamais lieu l'une

ns les liquides et dans les gaz, il n'y a lieu de consi-
les dilatations en volume.

ériences qui montrent la dilatation. — Pour démontrer
linéaire des métaux, on fait usage de l'appareil re-
ns la figure 233. Une tige métallique A est maintenue

Fig. 233 ($l = 50$).

de ses extrémités par une vis de pression B, tandis
elle est libre et en contact avec le plus petit bras
K, mobile sur un cadran. Au-dessous de la tige est un
ylindrique dans lequel on brûle de l'alcool. Le levier
ord au zéro du cadran; mais à mesure que la tige A
on le voit monter, ce qui rend sensible l'allongement

tion cubique des solides se démontre au moyen de l'*anneau de s'Gravesande*. On nomme ainsi un petit anneau métallique *m* (fig. 234) dans lequel passe librement, à la température ordinaire, une boule de cuivre rouge *a*, ayant à très-peu près le même diamètre que lui. Lorsque cette boule a été chauffée à la flamme d'une lampe à alcool, elle ne peut plus passer à travers l'anneau, ce qui démontre l'accroissement de volume.

Pour constater la dilatation des liquides, on soude à un petit
rre un tube capillaire (fig. 235). Le ballon et une partie
t remplis d'un liquide coloré, aussitôt qu'on l'échauffe,
élève dans le tube, de *a* en *b* par exemple, et la dila-
oujours beaucoup plus grande que dans les solides.

Le même appareil sert à montrer la dilatation des gaz. Pour cela, on remplit le ballon d'air ou de tout autre gaz, et l'on introduit dans le tube un index de mercure de 1 à 2 centimètres de longueur (fig. 236). Lorsqu'on échauffe le ballon, seulement en approchant la main, l'index est refoulé vers l'extrémité du tube, et finit par en être expulsé; d'où l'on conclut que, même pour un faible accroissement de chaleur, les gaz sont très-dilatables.

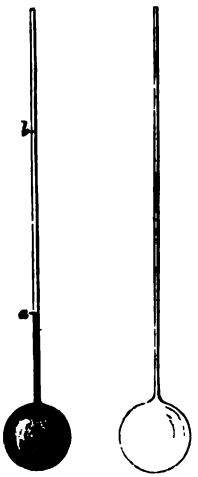


Fig. 235. Fig. 236.

Dans ces diverses expériences, dès que les corps se refroidissent, ils se contractent et lorsque la chaleur est revenue au même degré, ils reprennent exactement leur volume primitif.

MESURE DES TEMPÉRATURES

274. **Température.** — La *température* d'un corps est l'état actuel de la chaleur sensible dans ce corps, sans augmentation ni diminution. Si la quantité de chaleur sensible augmente ou diminue, on dit que la température s'élève ou s'abaisse. Dans la théorie dynamique de la chaleur, la température est l'état particulier de vibration des molécules. Dépendant de l'intensité de leur chaleur et, par suite, de leur masse et de leur vitesse, elle est la représentation de la force vive qu'elles possèdent.

275. **Thermomètres.** — On appelle *thermomètres* des instruments qui servent à mesurer les températures.

L'imperfection de nos sens ne nous permettant pas de mesurer la température des corps d'après les sensations plus ou moins vives de chaleur ou de froid qu'ils excitent en nous, on a dû recourir aux effets physiques que la chaleur produit sur les corps. Ces effets sont de plusieurs sortes. On a adopté les dilatations et les contractions comme les plus simples à observer.

Les solides étant très-peu dilatables, les corps dont on utilise la dilatation dans les thermomètres sont généralement les liquides. Cependant les physiciens font aussi usage de la dilatation des gaz dans un instrument connu sous le nom de *thermomètre à air*, que nous décrirons après la dilatation des gaz (324). Pour le moment, il ne sera question que des thermomètres à liquides. Ceux de ces corps exclusivement employés sont le mercure et l'alcool, le premier parce qu'il est de tous les liquides celui qui se dilate

ais, ou à Sanctorius, médecin vénitien.

mètre à mercure est le plus répandu. Il se compose llaire, de verre ou de cristal, soudé à un réservoir u sphérique de même matière. Le réservoir et une e sont remplis de mercure, et une échelle, graduée me, ou sur une plaque de cuivre qui lui est parallèle, la dilatation du liquide (fig. 241 et 242, page 248). dure de la tige au réservoir, laquelle se fait à la leur, la construction d'un thermomètre comprend s : la division du tube en parties d'égale capacité, du mercure dans le réservoir, et la graduation.

n du tube en parties d'égale capacité.— Les indica- nomètre n'étant exactes qu'autant que les divisions lacée sur le tube correspondent à des dilatations reure qui est dans le réservoir, il importe que l'é- duée de manière à indiquer des capacités égales r du tube. Si celui-ci était parfaitement cylindrique re constant, il suffirait, pour obtenir des capacités iser la longueur du tube en parties égales. Mais le tubes de verre étant, en général, plus fort à une à l'autre, il en résulte que des capacités égales du résentées, sur l'échelle, par des longueurs inégales. ernières qu'il s'agit de déterminer.

vant que le tube soit soudé au réservoir, on y intro- me de mercure de 2 à 3 centimètres, qu'on a soin

augmente. Si l'on observe ainsi que la colonne de mercure éprouve des variations de longueur de plusieurs millimètres, on rejette le tube, et l'on en cherche un plus régulier. Mais si ces variations sont peu sensibles, on colle le long du tube une bande de papier, et l'on marque un trait, au crayon, en regard des points occupés successivement par les extrémités de la colonne.

Les divisions ainsi formées indiquent nécessairement des capacités égales, puisqu'elles correspondent à un même volume de mercure. Or les intervalles de ces divisions étant assez rapprochés pour qu'on puisse regarder le diamètre du tube comme constant dans chacune d'elles, on passe à des divisions plus petites, en partageant les premières en un certain nombre de parties égales; ce qui s'obtient au moyen de la vis micrométrique (13). C'est ensuite à l'aide de ces divisions qu'on obtient une graduation exacte de l'échelle (281).

277. **Remplissage du thermomètre.** — Pour introduire le mercure dans le thermomètre, on soude, à l'extrémité supérieure de la tige, un entonnoir C (fig. 237), qu'on emplit de mercure; puis, inclinant un peu le tube, on dilate l'air qui est dans le réservoir, en chauffant celui-ci avec une lampe à alcool, ou en le plaçant sur une grille inclinée, comme pour le baromètre (fig. 116), et en l'entourant de charbons incandescents. L'air dilaté sort en partie par l'entonnoir C. Si on laisse refroidir le tube et qu'on le tienne dans une position verticale, l'air qui reste se contracte, et la pression atmosphérique force le mercure à passer dans le réservoir D, quelque capillaire que soit le tube. Mais le mercure cesse de pénétrer dans le réservoir lorsque l'air qui s'y trouve encore a pris, par la diminution de volume, une tension capable de faire équilibre au poids de l'atmosphère et à celui de la colonne de mercure qui est dans le tube. Chauffant alors de nouveau et laissant refroidir, il entre une nouvelle quantité de mercure, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne reste plus, dans le réservoir D, qu'un très-petit volume d'air. Pour le chasser, on chauffe jusqu'à ce que le mercure qui est dans le réservoir entre en ébul-

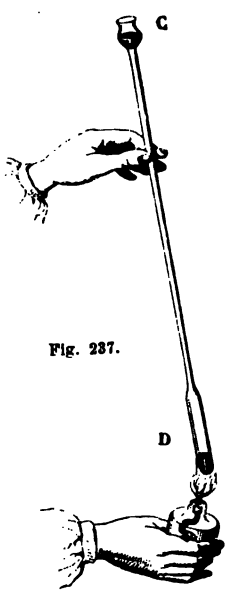


Fig. 237.

Les vapeurs de mercure, en se dégageant, entraînent avec air et l'humidité qui se trouvaient encore dans le tube et réservoir.

strument étant ainsi rempli de mercure sec et pur, on enlève noir C, puis on ferme le tube en en soudant l'extrémité à e. On a soin de chauffer auparavant le réservoir D, de ma- chasser la moitié ou les deux tiers du mercure qui est dans ; sinon, ce liquide ne pourrait se dilater sans briser le mètre. La quantité de mercure à expulser est d'autant plus que l'instrument est destiné à mesurer des températures levées. On a soin, en outre, au moment où l'on ferme le de chauffer le réservoir D de manière que le liquide dilaté e le sommet du tube. De la sorte, il ne reste pas d'air dans momètre, ce qui est nécessaire; car l'air comprimé, lorsque cure s'élève, pourrait faire éclater le tube.

Graduation du thermomètre, points fixes de son échelle. ès avoir rempli le thermomètre comme il vient d'être dit, il le graduer, c'est-à-dire à tracer sur la tige une échelle qui mesurer les variations de température. Pour cela, il a fallu ner, sur cette tige, deux points fixes qui représentassent des atures faciles à reproduire et toujours identiques.

'expérience a fait connaître que la température de fusion lace est invariable, quelle que soit rce de chaleur, et que l'eau distil- us la même pression et dans un e même matière, entre constam- n ébullition à la même tempéra- En conséquence, on a pris pour r point fixe, c'est-à-dire pour le e l'échelle, la température de la ndante, et pour second point fixe, représente par 100, la temperature ition de l'eau distillée, dans un métal, la pression atmosphérique m,76. La graduation du thermo- comprend donc trois opérations : mination du zéro, celle du point t le tracé de l'échelle.

Fig. 238.

Détermination du zéro. — Pour r le zéro, on remplit de glace pilée un vase dont le fond est l'un trou pour laisser écouler l'eau qui provient de la fusion glace (fig. 238). On plonge le réservoir du thermomètre et rtie de la tige dans cette glace, pendant un q[illegible]re

environ. La colonne de mercure s'abaisse graduellement, puis reste stationnaire. Alors, au point où s'arrête le mercure, on marque un trait au crayon sur une petite bande de papier préalablement collée sur la tige : c'est la place du zéro.

Ce zéro est arbitraire. Le *zéro absolu* serait celui qui correspondrait à l'absence de toute chaleur dans les corps, c'est-à-dire au repos absolu des molécules entre elles. On verra plus tard comment on l'évalue théoriquement, et de combien on admet qu'il est au-dessous de la température de la glace fondante (326).

280. **Détermination du point 100.** — Le second point fixe se détermine au moyen de l'appareil représenté dans les figures 239 et 240; l'une en montre l'ensemble pendant qu'il fonctionne, l'autre une coupe verticale. Tout l'appareil est de cuivre rouge. Une tubulure centrale A, ouverte à ses deux bouts, est fixée sur un vase cylindrique M, contenant de l'eau; une seconde tubulure B, concentrique avec la première, et l'entourant en entier, est fixée sur le même vase M. Cette seconde enveloppe, fermée à ses deux extrémités, est munie de trois tubulures *a*, E, D; dans la première est un bouchon au centre duquel passe la tige *t* du thermomètre dont on cherche le point 100; à la seconde est adapté un tube de verre *m*, contenant du mercure, et destiné à servir de manomètre pour mesurer la tension de la vapeur dans l'appareil; enfin, la troisième tubulure D sert de dégagement à la vapeur après qu'elle a circulé dans les tubulures.

L'appareil étant placé sur un fourneau et chauffé jusqu'à l'ébullition, la vapeur produite dans le vase M s'élève dans le tube A et se rend entre les deux enveloppes, comme le montrent les flèches, jusqu'à la tubulure D, d'où elle se dégage dans l'atmosphère. Le thermomètre *t* se trouvant ainsi entouré par la vapeur, le mercure qu'il contient se dilate, et lorsqu'il est devenu stationnaire, on marque au point *a*, où il s'arrête, un trait qui est le point 100 cherché. La deuxième enveloppe B empêche le refroidissement de la tubulure centrale par son contact avec l'air.

La détermination du point 100 de l'échelle thermométrique semble exiger que la hauteur du baromètre soit $0^m,76$ pendant l'expérience; car on verra bientôt que, lorsque cette hauteur est plus grande ou plus petite que $0^m,76$, non-seulement la température d'ébullition se trouve portée au-dessus ou au-dessous de 100 degrés, mais que la température de la vapeur est elle-même augmentée ou diminuée d'une quantité égale. Toutefois on peut obtenir exactement le point 100, quelle que soit la pression, par la correction suivante. L'expérience a fait voir que, lorsque la colonne barométrique monte ou s'abaisse de 27 millimètres, la tem-

[redacted]

e d'ébullition monte ou descend d'un degré, c'est-à-dire e degré par millimètre. Par conséquent, si la hauteur du tre est, par exemple, 766 millimètres au moment où l'on e point 100, l'excès de pression au-dessus de 760 étant de mètres, le nombre de degrés correspondant au sommet de

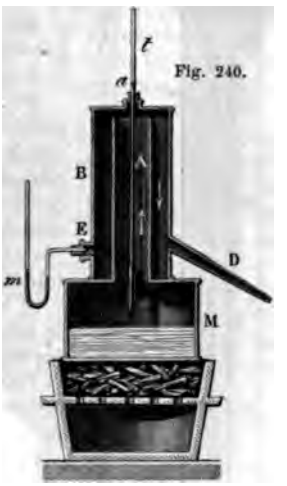


Fig. 240.

ne mercurielle dans le thermomètre n'est pas 100, mais $\frac{1}{9} \times 6 = 100 + \frac{2}{9}$.

ussac ayant observé que l'eau entre en ébullition à une ture un peu plus haute dans un vase de verre que dans un métal, et, de plus, la température d'ébullition étant élevée els que l'eau tient en dissolution, on a admis d'abord que, erminer le point 100 des thermomètres, il fallait faire un vase de métal et d'eau distillée. Mais ces deux dernières ns sont inutiles depuis la découverte de M. Rudberg, phy- nédois. Ce savant a reconnu, en effet, que la nature du les sels en dissolution influent bien sur la température ion de l'eau, mais *non sur celle de la vapeur qui se pro-* st-à-dire que l'eau étant à plus de 100 degrés, par l'une es ci-dessus, la vapeur qui s'en dégage est néanmoins à és, si la pression est $0^m,76$.

rs, pour prendre le point 100, il n'est pas nécessaire de ge d'eau distillée, ni d'un vase de métal. Il suffit,

sion étant $0^m,76$, ou la correction se faisant comme ci-
que le thermomètre plonge tout entier dans la vapeur et n
l'eau chaude.

Du reste, même en faisant usage d'eau distillée, le rése
thermomètre ne doit pas plonger d
bouillante; car il n'y a que la surface
ci qui soit réellement à 100 degrés.
pérature croissant de tranche en tra
le fond, à cause de l'excès de pressi

Fig. 241.

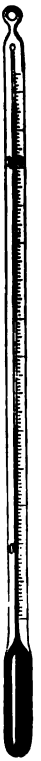


Fig. 242.

281. **Construction de l'échelle.**— l
points fixes obtenus, on partage l'i
qui les sépare en 100 parties d'ég
cité, qu'on nomme *degrés*, et l'on
ces divisions au-dessus du point 1
dessous du zéro, en les inscrivant
planchette de bois ou sur une plaq
tal à laquelle le thermomètre est fixé

Si le tube du thermomètre avai
le même diamètre, il suffirait, po
les degrés, de partager l'intervalle
et 100 en 100 parties égales; mais
dition n'étant jamais rigoureusem
faite, c'est ici qu'il faut faire usag
visions en parties d'égale capacit
d'abord été tracées sur le tube (2
cela, on compte le nombre de ces
comprises entre les deux points
divisant ce nombre par 100, on a l
de divisions et fraction de division
vaut à 1 degré; on en déduit ensuit
du zéro, la position de chaque de

Dans les thermomètres de préc
chelle est graduée sur le verre m
tige (fig. 242). Elle ne peut ainsi se
et sa longueur reste sensiblement
le verre étant très-peu dilatable.
cas, pour obtenir sur le verre
permanents, on recouvre, à chaud, la tige thermométri
légère couche de vernis; puis, avec une pointe d'acier, o
sur le vernis les traits de l'échelle, et les chiffres corresp
On expose enfin la tige, pendant dix minutes environ, à de
d'acide fluorhydrique, qui jouit de la propriété d'attaquer
et qui grave les traits en creux partout où le vernis a é

Les degrés se désignent par un zéro placé à droite du nombre qui marque la température, et un peu au-dessus. Enfin, pour distinguer les températures au-dessous de zéro de celles qui sont au-dessus, on les fait précéder du signe — (*moins*); 15 degrés au-dessous de zéro se représentent donc par — 15°.

282. Différentes échelles thermométriques. — On distingue, dans la graduation des thermomètres, trois échelles : l'*échelle centigrade*, l'*échelle de Réaumur* et l'*échelle de Fahrenheit*.

L'échelle centigrade est celle dont nous avons indiqué ci-dessus la construction, et dont on fait généralement usage en France. Elle est due à Celsius, physicien suédois, mort en 1744.

Dans la seconde échelle, adoptée en 1731 par Réaumur, physicien français, les deux points fixes correspondent encore à la température de la glace fondante et à celle de l'eau bouillante; mais cet intervalle est partagé en 80 degrés. C'est-à-dire que 80 degrés Réaumur équivalent à 100 degrés centigrades; 1 degré R. égale donc $\frac{100}{80}$ ou $\frac{5}{4}$ de degré c.; et réciproquement, 1 degré c. égale $\frac{80}{100}$ ou $\frac{4}{5}$ de degré R. Donc, pour convertir un nombre de degrés R. en degrés c., 20 degrés, par exemple, il faut multiplier ce nombre par $\frac{5}{4}$; car 1 degré R. égalant $\frac{5}{4}$ de degré c., 20 degrés R. valent 20 degrés c. 20 fois $\frac{5}{4}$ ou 25. De même, pour convertir les degrés c. en degrés R., il faut les multiplier par $\frac{4}{5}$.

Fahrenheit adopta, en 1714, une échelle dont l'usage s'est répandu depuis en Hollande, en Angleterre et dans l'Amérique du Nord. Le point fixe supérieur de cette échelle correspond encore à la température de l'eau bouillante; mais le zéro correspond au degré de froid qu'on obtient en mélangeant des poids égaux de sel ammoniac pilé et de neige, et l'intervalle des deux points est divisé en 212 degrés. Le thermomètre de Fahrenheit, dans la glace fondante, marque 32 degrés; par conséquent, 100 degrés centigrades équivalent, en degrés F., à 212 moins 32, ou 180; 1 degré c. vaut donc $\frac{180}{100}$ ou $\frac{9}{5}$ de degré F., et, réciproquement, 1 degré F. égale $\frac{100}{180}$ ou $\frac{5}{9}$ de degré c.

Cela posé, soit à convertir en degrés c. un certain nombre de degrés F., 95 par exemple. On doit d'abord retrancher 32 du nombre donné, afin de compter les deux sortes de degrés d'un même point de la tige. Le reste est ici 63; or 1 degré F. valant $\frac{5}{9}$ de degré c., 63 degrés F. égalent $\frac{5}{9} \times 63$, ou 35 degrés c.

En représentant par t_f la température donnée en degrés Fahrenheit, et par t_c la température correspondante en degrés centigrades, on a la formule

$$t_c = (t_f - 32)\frac{5}{9} \text{ [1]},$$

qui indique les calculs à effectuer pour opérer la conversion; de cette égalité

on tire $t_f = t_c \times \frac{9}{5} + 32$ [2], formule qui sert à convertir les degrés centigrades en degrés Fahrenheit.

Ces formules sont générales et s'appliquent à toutes les températures au-dessus ou au-dessous des zéros des échelles à comparer; seulement il faut tenir compte des signes de t_f et de t_c. Par exemple, soit proposé de trouver quelle est la température en degrés centigrades lorsque le thermomètre Fahrenheit marque 5°; on a, par la formule [1] : $t_c = (5 - 32)\frac{5}{9} = -\frac{27 \times 5}{9} = -15$.

De même, le thermomètre centigrade marquant -15, la formule [2] donne

$$t_f = -15 \times \frac{9}{5} + 32 = -27 + 32 = 5^\circ.$$

S'il s'agissait de convertir des degrés Fahrenheit en degrés Réaumur, on trouverait facilement que l'équation [1] ci-dessus prend la forme

$$t_r = (t_f - 32)\frac{4}{9} \text{ [3]}.$$

283. **Déplacement du zéro.** — Les thermomètres construits même avec le plus grand soin sont soumis à une cause d'erreur dont il importe de tenir compte : c'est qu'avec le temps, le zéro tend à se relever, le déplacement allant quelquefois jusqu'à deux degrés. C'est-à-dire que, le thermomètre étant plongé dans la glace fondante, le mercure ne descend plus au zéro.

On a d'abord attribué ce phénomène à une diminution du volume du réservoir, laquelle résulterait de la pression extérieure, le vide étant fait dans le thermomètre; mais on a observé que dans les thermomètres qui contiennent de l'air, ou qui sont ouverts à l'extrémité de la tige, le zéro se déplace comme dans ceux qui sont vides. Aujourd'hui, on explique le déplacement du zéro par un travail moléculaire que subit le verre du réservoir lorsque, porté à la température d'ébullition du mercure, il se refroidit rapidement. D'où résulte une espèce de trempe qui augmente le volume du réservoir, et c'est parce que celui-ci revient ensuite peu à peu à son volume primitif, que le zéro se trouve relevé. Ce travail est du reste extrêmement lent; car, d'après les expériences de Despretz, le zéro remonte pendant plusieurs années.

Outre le déplacement lent dont on vient de parler, on observe des variations brusques dans la position du zéro, toutes les fois que le thermomètre a été porté à une température élevée. En effet, si on le plonge alors dans la glace fondante, le mercure ne descend pas au zéro, et n'y revient qu'au bout d'un certain temps.

Il importe donc, lorsqu'il s'agit de mesurer une température avec précision, de vérifier d'abord la position du zéro dans le thermomètre dont on veut faire usage.

284. **Limites de l'emploi du thermomètre à mercure.** — Le mercure entre en ébullition à 350 degrés et se congèle à — 39.

t donc là deux limites qu'on ne peut dépasser dans l'emploi du rmomètre à mercure. Mais l'expérience ayant appris que la di-ation du mercure n'est *régulière*, c'est-à-dire proportionnelle à tensité de la chaleur, que de — 36 à 100 degrés, et qu'au delà coefficient de dilatation va en croissant depuis 100 jusqu'à 350 rés, il s'ensuit que le thermomètre à mercure ne donne des ications précises que de — 36 à 100 degrés; pour les tempéra-es plus élevées, ses indications ne sont qu'approchées, l'erreur ivant s'élever à plusieurs degrés.

Du reste, souvent deux thermomètres à mercure, d'accord à zéro 100 degrés, ne le sont plus entre ces deux points, quoique sés dans les mêmes conditions. Cela résulte de ce que tous les res, n'ayant pas la même composition chimique, ne sont pas lement dilatables. Par suite, la dilatation qu'on observe dans le rmomètre étant *apparente* (309), c'est-à-dire l'excès de la dila-on absolue du mercure sur celle du verre, toutes les fois que x thermomètres ne sont pas formés d'un verre identique, il y une cause d'erreur, qui fait qu'ils ne marchent pas ensemble, qu'on exprime en disant qu'ils ne sont pas *comparables*.

Les différentes remarques et celles faites dans le paragraphe cédent montrent combien la détermination des températures sente de chances d'erreur, et les soins qu'elle exige.

285. **Conditions de sensibilité.** — On peut considérer la sensibi-é d'un thermomètre sous deux points de vue. En effet, un ther-mètre est *sensible* : 1° lorsqu'il accuse de très-petites varia-ns de température; 2° quand il se met promptement en équi-re de température avec les corps ambiants.

On obtient le premier genre de sensibilité en donnant au ther-omètre une tige très-capillaire soudée à un réservoir un peu gros. marche du mercure dans la tige est alors limitée à un petit mbre de degrés, par exemple de 10 à 20, ou de 20 à 30; et cha-e degré occupe une grande longueur sur la tige, ce qui donne moyen d'évaluer des fractions de degré très-petites. Sous le om de *thermomètre métastatique*, Walferdin a construit un hermomètre qui permet d'apprécier les millièmes de degré.

Le second genre de sensibilité se réalise en donnant au thermo-ètre un très-petit réservoir; car moins celui-ci a de masse, plus prend rapidement la température du milieu dans lequel il est.

286. **Thermomètre à alcool.** — Le *thermomètre à alcool* ne dif-re du thermomètre à mercure que parce qu'il est rempli d'alcool loré en rouge avec de l'orseille. Son remplissage, par suite de la mpérature peu élevée, 79 degrés, à laquelle l'alcool entre en ullition, est plus simple que celui du thermomètre à mercure.

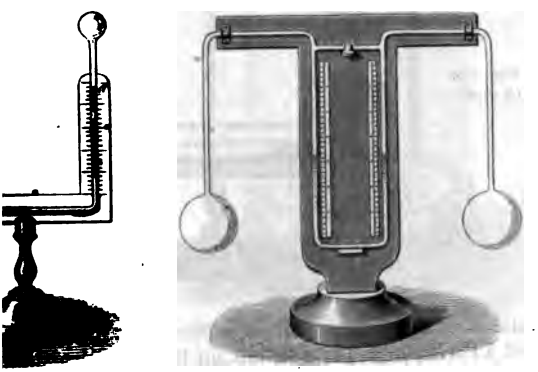
Après avoir chauffé légèrement le réservoir à la lampe pour sortir un peu d'air, on plonge l'extrémité ouverte de la tige l'alcool coloré en rouge ; par le refroidissement, l'air qui dans le réservoir se contracte, et la pression atmosphérique monter une petite quantité d'alcool (fig. 243). Chauffant alo qu'à l'ébullition, les vapeurs d'alcool qui se dégagent ent tout l'air qui se trouve dans le réservoir et dans la tige. donc, après quelques instants d'ébullition, de retourner b ment le thermomètre et d'en plonger de nouveau l'extrémi l'alcool. Les vapeurs se condensant, le vide se fait à l'inté par l'effet de la pression de l'atmosphère le réservoir et l remplissent complétement. Toutefois, l'alcool qui pénètre réservoir s'échauffant, l'air qui y était en dissolution se et une petite bulle gazeuse apparaît. Pour l'expulser, o tube à l'extrémité d'une petite corde, et on lui imprime vement de rotation rapide, la boule à l'extérieur. Par l'e force centrifuge, l'alcool, qui a le plus de masse, est ref la boule et en chasse la bulle d'air. On chauffe enfin d jusqu'à faire sortir la moitié ou les deux tiers du liquide dans la tige, puis on en soude l'extrémité à la lampe, mais soin d'y laiss Celui-ci est par sa force à retarder le bullition de et à s'oppo qu'on incline à ce que la liquide se plusieurs pa

Fig. 243.

Il reste à g thermomètre la, on prend dans la glace comme pour momètre à mercure ; mais pour point supérieur de l'échel peut prendre la température de l'eau bouillante, car, l'alco en ébullition à 79 degrés, bien avant cette température, tion serait très-irrégulière, et, au delà, la vapeur d'alcool a une tension qui pourrait briser le tube. C'est pourquoi l tion se fait comparativement avec un thermomètre étalo cure, et en prenant seulement pour limite supérieure de 60 ou 70 degrés. Pour cela, on chauffe lentement, dans u

momètre à mercure et le thermomètre à alcool, et l'on
cessivement sur ce dernier les températures données
nomètre à mercure. Ainsi gradué, le thermomètre à
mparable au thermomètre à mercure, c'est-à-dire
les mêmes températures, lorsqu'il est placé dans les
itions. Le thermomètre à alcool est surtout employé
r les très-basses températures, parce que ce liquide
e pas par les plus grands froids connus. Toutefois, à
es températures, l'alcool absolu se séparant en partie
liquide devient sirupeux; de plus, les différents al-
t pas identiques, on a vu des thermomètres à alcool,
n refroidissement égal, différer de plusieurs degrés.
à ce double inconvénient, on a proposé de remplacer
le sulfure de carbone, liquide qui ne contient point
serve la même fluidité aux plus basses températures;
Pierre a fait voir que les liquides qu'on doit préférer
sulfurique et le chlorure d'éthyle.

rmomètre différentiel de Leslie. — Leslie, physicien
ort en 1832, a construit un thermomètre à air destiné
aître la différence de température de deux points voi-



44 (h=43). Fig. 245.

le nom de *thermomètre différentiel*. Cet instrument se
deux boules de verre égales, remplies d'air, et réunies
e recourbé, d'un petit diamètre, fixé sur une plan-
. 244). Avant que l'appareil soit fermé, on y introduit
coloré, en quantité suffisante pour remplir la branche
du tube et la moitié environ des branches vert-
de choisir un liquide qui ne donne pas de vape

températures ordinaires; c'est pourquoi on fait usage d'acide sulfurique coloré en rouge. L'appareil étant ensuite fermé, on fait passer de l'air d'une boule dans l'autre, en les chauffant inégalement, jusqu'à ce qu'après quelques tâtonnements, les deux boules étant revenues à la même température, le niveau soit le même dans les branches verticales. On marque alors un zéro à chaque extrémité de la colonne liquide. Pour achever la graduation, on porte l'une des boules à zéro, et l'autre à 10 degrés. L'air de la dernière se dilate et refoule la colonne liquide *bs* qui s'élève dans l'autre branche. Lorsque cette colonne est devenue stationnaire, on marque 10, de chaque côté, au point où s'arrête le niveau du liquide; puis on partage les intervalles de zéro à 10 en dix parties égales, et l'on continue les divisions au-dessus et au-dessous du zéro, le long de chaque branche.

La figure 245 représente la disposition que M. Matthiessen a donnée au thermomètre différentiel pour en faire usage dans les liquides.

288. **Thermoscope de Rumford.** — Dans le même temps que

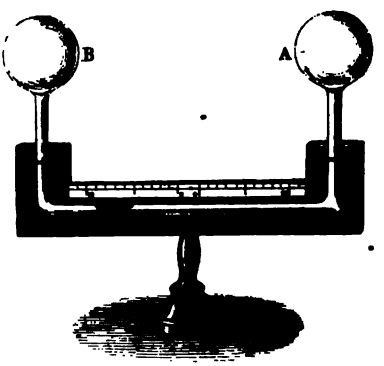


Fig. 246 (h=40).

Leslie inventait le thermomètre différentiel, Rumford, Américain mort à Paris, en 1814, adoptait un thermomètre analogue, qui a reçu le nom de *thermoscope de Rumford*. Cet instrument diffère peu du précédent; seulement les boules en sont plus grosses, la branche horizontale plus grande, et c'est le long de cette branche qu'est la graduation. L'index E (fig. 146) n'a que deux centimètres de longueur environ, et l'on marque encore un zéro à chaque extrémité, lorsque, les deux boules étant à la même température, l'index occupe le milieu de la branche horizontale. Le reste de la graduation se fait ensuite entièrement comme pour le ther-

mètre de Leslie. Un appendice D sert à régler l'appareil : lorsqu'il y a trop d'air dans l'une des boules, on fait passer l'index dans l'appendice, ce qui permet à l'air de se rendre dans l'autre boule. Il suffit ensuite d'incliner le thermomètre pour faire sortir l'index et lui faire prendre la position qu'il doit occuper ; ce qu'on n'obtient toutefois qu'après quelques essais.

289. **Thermomètre métallique de Bréguet.** — Abraham Bréguet, horloger à Paris, mort en 1823, a imaginé un thermomètre fondé sur l'inégale dilatabilité des métaux, remarquable par sa grande sensibilité. Cet instrument est formé de trois lames superposées, de platine, d'or et d'argent. Soudées ensemble dans toute leur longueur, elles sont ensuite passées au laminoir de manière à ne former qu'un ruban métallique très-mince. On contourne ce ruban en hélice ; puis, ayant fixé l'extrémité supérieure à un support, on suspend à l'autre extrémité une aiguille légère de cuivre, libre de se mouvoir sur un cadran horizontal sur lequel est graduée une échelle centigrade (fig. 247).

Fig. 247 (h = 10).

L'argent, qui est le plus dilatable des trois métaux, forme la face intérieure de l'hélice ; le platine, qui est le moins dilatable, est à l'extérieur, et l'or est entre les deux. Lorsque la température s'élève, l'argent se dilatant plus que le platine et l'or, l'hélice se déroule ; l'effet contraire a lieu quand la température baisse. L'or est placé entre les deux autres métaux, parce qu'il a une dilatation intermédiaire entre celles de l'argent et du platine. Il n'employant que ces deux derniers métaux, leur différence de dilatation pourrait occasionner une rupture. Ce thermomètre se réduit comparativement à un thermomètre étalon à mercure. Une tige métallique *a*, représentée sur la gauche de la figure, passe dans l'axe de l'hélice, pour la soutenir et l'empêcher de se déformer lorsqu'on déplace l'instrument.

290. **Thermomètre à maxima et à minima de Rutherford.** — Dans les observations météorologiques, il est nécessaire de con-

naître la plus haute température du jour et la plus basse température de la nuit. Les thermomètres ordinaires ne pourraient conduire à la connaissance de ces températures que par une observation continue, ce qui serait tout à fait impraticable. Aussi a-t-on imaginé, à cet effet, un assez grand nombre d'instruments. Le plus simple est celui de Rutherford. Sur une glace sont fixés deux

Fig. 248.

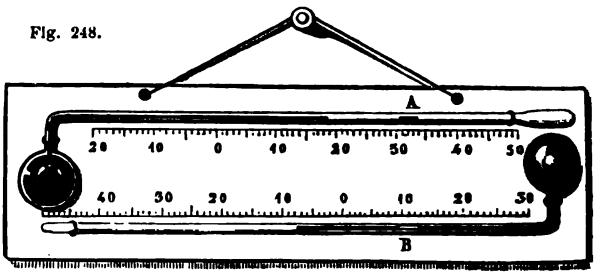


Fig. 249.

thermomètres dont les tiges sont recourbées horizontalement. Dans le premier, qui est à mercure, est un petit cylindre de fer A (fig. 248), qui peut glisser librement dans le tube. Ce cylindre, qui sert d'index, étant mis en contact avec l'extrémité de la colonne de mercure, et l'instrument étant disposé horizontalement, lorsque la température s'élève, le mercure se dilate et pousse devant lui l'index. Celui-ci s'arrête aussitôt que le mercure cesse de se dilater; mais il demeure au même point de la tige lorsque le mercure se contracte, parce qu'il n'y a pas adhérence entre ce liquide et le fer. Le point où s'arrête l'index marque donc la plus haute température qui s'est produite; sur le dessin, l'index marque un peu plus de 30 degrés.

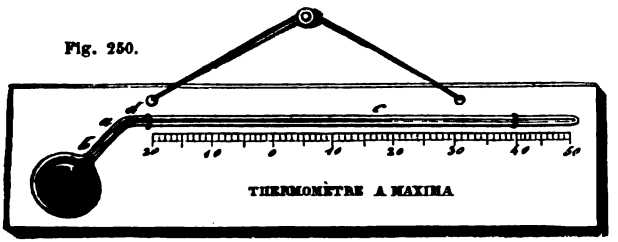
Dans le thermomètre à minima, le liquide est de l'alcool dans lequel plonge entièrement un petit cylindre d'émail B destiné à servir d'index (fig. 249). Si la température baisse tandis que le cylindre est à l'extrémité de la colonne liquide, celle-ci, en se contractant, l'entraîne avec elle par un effet d'adhésion, et l'index avance ainsi jusqu'au point où a lieu le maximum de contraction du liquide. Quand la température s'élève, l'alcool se dilate et passe entre la paroi du tube et l'index, sans que celui-ci se déplace. Par conséquent, l'extrémité de l'index opposée au réservoir indique la plus basse température à laquelle a été porté l'instrument : — 9° $\frac{1}{2}$ dans le dessin ci-dessus.

* 291. **Thermomètre à maxima de Negretti et Zambra.** — Le thermomètre à maxima de Rutherford présente l'inconvénient de

être pas portatif, car si on le meut trop brusquement, le petit dex de fer s'engage dans le mercure, et alors, quand ce liquide dilate, il ne chasse plus devant lui l'index, mais passe dans ntervalle qui existe entre celui-ci et le verre. L'index reste alors mobile, et le thermomètre ne fonctionne plus.

Pour obvier à cet inconvénient, Negretti et Zambra ont modifié t instrument. Ayant introduit dans le tube du thermomètre un

Fig. 250.



tit index de verre *ad* (fig. 250), ils chauffent à la lampe et courant le tube, là même où est l'index, de manière que celui-ci soit e, mais cependant n'obstrue pas le tube et ne s'oppose pas à la atation du mercure qui est dans le réservoir.

Le thermomètre étant placé horizontalement, lorsque la température s'élève, le mercure du réservoir se dilate, passe entre l'in- et les parois du tube, et avance, par exemple, jusqu'en *c;* mais squ'il y a ensuite abaissement de température et contraction du rcure, la résistance que celui-ci éprouve pour repasser entre ndex et le tube l'emportant sur la cohésion des molécules de rcure entre elles, la colonne *dc* reste en place, et le vide se fait *a* en *b*. On a donc en *c* la température maxima à laquelle l'inument a été porté. Pour ramener ensuite le mercure au-dessus de l'index, il n'y a qu'à tenir un instant le tube dans une sition verticale, le mercure passe en vertu de son poids.

Quant à l'erreur qui peut résulter du refroidissement de la colonne de mercure *cd*, au moment où on consulte le thermomètre, le peut être négligée; car en appliquant les formules sur les dilations (305 et 311), on trouve que, pour un refroidissement de degrés, cette erreur ne peut dépasser 1 dixième de degré.

* **292. Thermomètre à maxima de Walferdin.** — Ce thermomètre, qui est à déversement, a la forme d'un thermomètre à ercure ordinaire. Seulement, à la partie supérieure, il est terminé par un petit réservoir ou *panse*, où pénètre la tige, qui se rmine en pointe effilée et ouverte (fig. 251). Dans cette panse t du mercure destiné à *amorcer* l'instrument, c'est-à-d

remplir la tige complétement à chaque observation. Pour on chauffe le réservoir inférieur jusqu'à ce que le mercure latant, commence à sortir par la pointe effilée qui termine l Retournant alors l'instrument, le mercure qui est dans la descend vers la pointe, et celle-ci se trouve y plonger en

Fig. 251 (h=26).

On laisse ensuite le thermomètre se refroidir lent en ayant soin de le tenir toujours renversé. Par le dissement, le mercure du réservoir se contracta certaine quantité passe, par un effet de cohésion panse dans la tige, et celle-ci se trouve complé remplie.

Pour faire usage de cet instrument, on comme l'amorcer à une température inférieure à celle q git d'observer, puis on le place dans le lieu dont connaître le maximum de température. S'il vient à se refroidir, il n'y a aucun inconvénient, p n'entre ni ne sort de mercure. Mais si la temp s'élève, le mercure se dilate, une partie se déver la panse sans pouvoir rentrer dans le thermomètre qu'alors celui-ci est dans la position représent la figure ci-contre. Pour déterminer ensuite la plu température à laquelle l'instrument a été porté, de le comparer à un thermomètre étalon, en les cl tous les deux graduellement dans un bain, jusqu'à le mercure, dans le thermomètre à déversem monte au sommet de la tige et soit prêt à sortir. tant alors le thermomètre étalon, la température indique est très-approximativement la plus hau quelle a été porté le thermomètre à maxima.

Walferdin a aussi construit un thermomètre à ma; il est encore à déversement, mais à deux liq d'un usage moins facile que le précédent. Ces t mètres sont surtout utilisés pour prendre les plus ou les plus basses températures du fond des la mers ou des puits. Toutefois il faut alors les ren dans un tube de verre qu'on soude ensuite à la afin de les soustraire à la pression extérieure, qui diminu volume du réservoir et en ferait sortir un excès de mercu

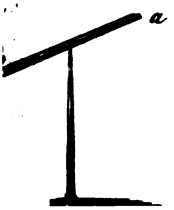
293. **Pyromètres.** — On nomme *pyromètres* des instr propres à mesurer les hautes températures. On donne quel le nom de pyromètre à l'appareil de la figure 233; mais de nière dont il est construit, ce n'est réellement qu'un *pyro*

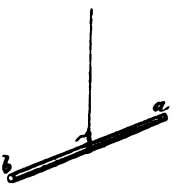
Brongniart, à Sèvres, avait fait construire, pour la fabri

u ici sont fondés sur la dilatation des corps; mais la
ne naissance à des phénomènes électriques à l'aide
peut aussi déterminer les températures. Nous allons
ıs le nom de *thermo-multiplicateur*, un instrument
extrêmement sensible. Toutefois, comme sa théorie
les phénomènes magnétiques et sur des phénomènes
qui ne sont pas encore connus du lecteur, il nous faut
quelques notions sur le magnétisme et l'électricité,
ccinctes, ces matières devant être traitées plus loin
eloppements qu'elles comportent.

ONS SUR LES AIMANTS ET SUR LES PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

mant et aiguille aimantée. — On nomme *aimant* un
qui, à distance, attire le fer et quelques autres sub-
ce propriété pouvant, par friction contre un aimant,





rectrice, en vertu de laquelle elle se place toujours d'elle-même sensiblement dans la direction du nord au sud, et y revient toutes les fois qu'on l'en écarte. L'extrémité qui se tourne vers le nord est toujours la même, on la nomme *pôle austral;* celle qui regarde le sud est le *pôle boréal.* Dans l'étude du magnétisme, nous dirons d'où viennent ces dénominations, qui paraissent en opposition avec l'orientation des pôles.

On construit aussi des *électro-aimants,* qui sont beaucoup plus puissants que les aimants naturels. Ils consistent en barreaux de fer doux autour desquels s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie. Tant qu'un courant électrique (296) passe dans le fil, le barreau est fortement aimanté, mais revient à l'état naturel aussitôt que le courant est interrompu.

296. **Piles et courants thermo-électriques.** — On verra plus tard que l'*électricité* est un agent puissant, qui se développe dans les corps par le frottement, par les actions chimiques et aussi par l'influence de la chaleur. Les appareils qui dégagent de l'électricité par les actions chimiques sont connus sous le nom de *piles hydro-électriques,* et ceux qui en produisent par l'effet de la chaleur, sous le nom de *piles thermo-électriques.*

On ignore ce que c'est que l'électricité; mais, en général, on admet qu'elle consiste en un fluide spécial, qui existe dans tous les corps: mis en liberté par une des trois causes énoncées ci-dessus, ce fluide se propage, probablement sous la forme d'ondes, de *flux,* avec une vitesse qui, dans certains corps qu'on appelle *bons conducteurs,* s'élève à 160 000 kilomètres par seconde. Dans les corps *mauvais conducteurs,* la propagation est beaucoup plus lente et même nulle. Les meilleurs conducteurs sont les métaux.

On nomme *courant* le flux électrique qui se propage dans un corps conducteur. Lorsqu'on réunit les deux extrémités d'une pile par un fil métallique, un courant se propage dans ce fil, et l'on nomme *pôle positif* de la pile l'extrémité d'où part le courant; l'autre extrémité est le *pôle négatif.*

Les courants engendrés par la chaleur sont dits *courants thermo-électriques.* Leur intensité est faible comparativement à celle des courants hydro-électriques. Pour qu'un courant thermo-électrique se produise, il faut un circuit métallique composé de métaux différents, dont les points de contact soient, de deux en deux, à des températures inégales. C'est la non-homogénéité du circuit métallique dans lequel la chaleur se propage qui donne naissance à un courant. Les métaux qui fournissent ainsi le plus grand dégagement d'électricité sont le bismuth et l'antimoine.

La pile thermo-électrique la plus simple se compose d'un bar-

bismuth B soudé en C à un barreau d'antimoine A (fig. 254). ux extrémités libres étant réunies par un fil de cuivre, on a uit complet dans lequel il ne se propage aucun courant tant diverses parties en sont à la même température; mais si auffe la soudure C, un courant prend aussitôt naissance,

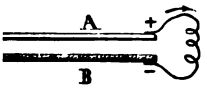


Fig. 254.

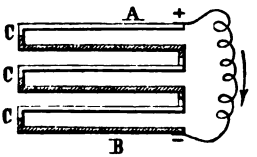


Fig. 255.

dans le fil, de l'antimoine vers le bismuth; c'est-à-dire ntimoine correspond le pôle positif, et au bismuth le pôle . Si, au lieu de chauffer la soudure C, on la refroidit, il y a courant, mais de sens contraire. Dans les deux cas, le cou- t d'autant plus intense, que l'échauffement ou le refroidis- est plus considérable.

ystème d'un barreau de bismuth et d'un barreau d'anti- soudés ensemble forme un *couple* thermo-électrique. Un uple ne fournit qu'un courant très-faible; mais si l'on soude ux plusieurs couples à la suite les uns des autres, de ma- ue toutes les soudures de rang impair soient à une même ité, et les soudures de rang pair à l'autre, on a, sous un olume, une pile d'autant plus intense, que les couples sont ombreux (fig. 255). On réduit encore le volume de la pile

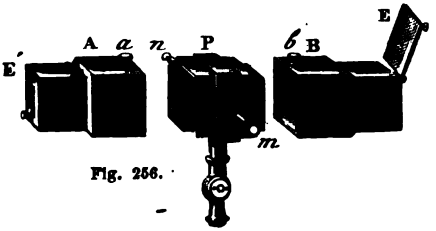


Fig. 256.

osant parallèlement, les unes à côté des autres (fig. 256), rs séries de couples semblables à celle de la figure 255; le r bismuth de la première série se soude latéralement au r antimoine de la deuxième, et ainsi de suite, au nombre ou six séries, de manière à former un ensemble de 25 ou ples, dont les barreaux ont *environ 30* millimèt

gueur. La pile ainsi disposée est maintenue dans une mont cuivre P supportée par un pied à charnière, ce qui permet donner différentes inclinaisons. Les couples sont isolés les u autres et de la monture par des bandes de papier verni. Enf les côtés de l'appareil sont fixées deux bornes *m*, *n*, qui co niquent, l'une avec le premier antimoine, l'autre avec le d bismuth; ce sont les deux pôles de la pile. Pour protéger le faces de celle-ci, deux étuis rectangulaires A et B se fixent vis de pression *a* et *b* sur la pièce P. Enfin, deux écrans I qu'on élève ou qu'on abaisse à volonté, permettent de ne arriver la chaleur que sur une des faces de la pile.

297. **Action directrice des courants sur les aimants.** — Lor courant parcourt un fil métallique *mn* placé près d'une a

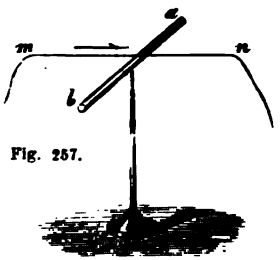


Fig. 257.

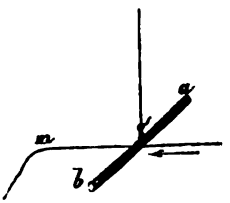


Fig. 258.

aimantée *ab* (fig. 257), le courant agit à distance sur l'a pour lui imprimer les déviations suivantes :

Si le courant passe au-dessus de l'aiguille, du sud a (fig. 257), ou au-dessous, du nord au sud (fig. 258), dans le cas, le pôle austral de l'aiguille, c'est-à-dire celui qui reg nord, *dévie vers l'ouest*.

Si le courant se dirige en sens contraire, c'est-à-dire d au sud dans le premier cas, et du sud au nord dans le sec pôle austral *dévie vers l'est*.

Dans tous les cas, le courant tend à placer l'aiguille per culairement à la direction du fil qu'il parcourt; mais cette p dicularité n'est jamais atteinte, à cause de l'influence magn de la terre qui agit pour maintenir l'aiguille dans sa positi mière. Toutefois, si l'on combine deux aiguilles d'égale force au-dessus, l'autre au-dessous du courant, les pôles contrai regard, l'action de la terre se trouvant équilibrée, le systè deux aiguilles se met rigoureusement en croix avec le cour système constitue ce qu'on appelle une *aiguille astatique*.

298. **Galvanomètre.** — On vient de voir qu'un courant qui

s de l'aiguille aimantée, du sud au nord, fait dévier le
ral vérs l'ouest, et qu'un courant qui passe au-dessous,
u sud, produit la même déviation; par suite, si le même
au-dessus de l'aiguille, du sud au nord, revient au-des-
nord au sud (fig. 259), les deux effets s'ajoutent, et la
est plus grande. Par la même raison, si l'on continue
r le fil autour de l'aiguille, dans le sens de sa longueur,
nombre de fois (fig. 260), 200 fois par exemple, on mul-
sidérablement l'action du courant, et on a un instrument
nel l'aiguille dévie pour les courants les plus faibles;
multiplicateur ou *galvanomètre*. Il est nécessaire que le
enroule autour de l'aiguille soit recouvert de soie qui en
circuits; sinon, tous les fils se touchant, il n'y aurait

59.

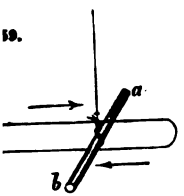
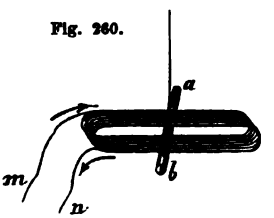


Fig. 260.



cuit unique, et l'effet ne serait pas *multiplié*. Pour pré-
ppareil des agitations de l'air, on le recouvre d'une cage
en dehors de laquelle sont deux bornes de cuivre, aux-
boutissent les bouts du fil galvanométrique (fig. 261).
ns du circuit, on fixe un disque de cuivre portant une
raduation jusqu'à 90 degrés, à droite et à gauche du dia-
rallèle à l'enroulement du fil, et destine à mesurer les dé-
le l'aiguille; enfin, celle-ci est astatique et suspendue à un
on, un de ses barreaux dans le circuit, l'autre au-dessus.

Thermo-multiplicateur. — Le *thermo-multiplicateur* est
eil thermométrique extrêmement sensible qui, comme
la figure 261, consiste dans la réunion du galvanomètre
ile thermo-électrique. Des pôles *m* et *n* de la pile partent
de cuivre, qui se rendent à deux bornes fixées en dehors
ge du galvanomètre, lesquelles sont en contact chacune
des bouts du circuit galvanométrique. Par suite, dès
urant thermo-électrique prend naissance dans la pile, il
au galvanomètre par un des fils *a* ou *b*, et revient par
Avant de faire passer le courant dans le circuit galvano-
, on a soin d'orienter l'appareil de manière que les fils
it soient parallèles à la direction de l'ai [illegible] ntée.

C'est ensuite la déviation du pôle austral à l'ouest ou à l'est qui fait connaître la direction du courant, et s'il y a eu échauffement ou refroidissement (297).

Quant à la quantité de chaleur reçue ou perdue par la pile, on la mesure par le nombre de degrés dont l'aiguille s'est écartée, dans un sens ou dans l'autre, de sa position première. En effet,

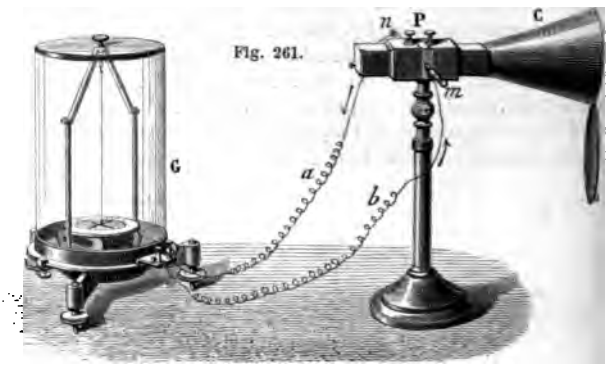


Fig. 261.

l'expérience a appris que, jusqu'à 20 degrés du galvanomètre, les déviations de l'aiguille sont proportionnelles à la quantité de chaleur qui tombe sur la pile. Pour des déviations plus grandes, nous dirons, en traitant spécialement du galvanomètre, comment on construit des tables qui donnent l'intensité de la chaleur correspondante aux différents angles d'écart de l'aiguille.

Afin d'arrêter les rayons calorifiques autres que ceux qu'on veut étudier, on place, sur la face de la pile exposée à la source de chaleur ou de froid, un cône de cuivre C noirci à l'intérieur. Un écran circulaire, qu'on abaisse ou qu'on élève à volonté, sert à laisser passer ou à intercepter la chaleur.

Pour faciliter l'étude du rayonnement (415) et du pouvoir diathermane des corps (436), Melloni, physicien italien, mort en 1849, a ajouté à l'instrument que nous venons de décrire plusieurs pièces accessoires, et l'a disposé comme le montrent les figures 337 et 348 ci-après. C'est sous cette forme que l'appareil prend le nom de *thermo-multiplicateur de Melloni*.

Enfin, remarquons, en terminant, que le thermo-multiplicateur est un véritable thermomètre différentiel (287); c'est-à-dire qu'il ne donne point la température du lieu dans lequel il est placé, mais la différence entre la température de ce lieu et celle d'un lieu voisin.

CHAPITRE II

DILATATION DES SOLIDES

Dilatation linéaire et dilatation cubique, coefficient de di- — On a déjà vu (272) qu'on distingue, dans les corps so- eux sortes de dilatations : la *dilatation linéaire*, c'est- ivant une seule dimension, et la *dilatation cubique*, e en volume.

me *coefficient de dilatation linéaire* l'allongement que nité de longueur d'un corps, lorsque sa température s'é- zéro à 1 degré, et *coefficient de dilatation cubique* l'ac- ment que prend, dans le même cas, l'unité de volume. oefficients varient d'un corps à l'autre ; mais, pour un même il existe entre eux cette relation simple, que *le coefficient tation cubique est triple du coefficient de dilatation li-* . On peut donc, en multipliant ou en divisant par 3, trou- de ces coefficients lorsque l'autre est connu.

montrer que le coefficient de dilatation cubique est triple du coeffi- dilatation linéaire, soit un cube dont le côté égale 1 à zéro. Si l'on re- à l'allongement que prend ce côté en passant de zéro à 1 degré, à 1 degré sera $1+k$, et le volume du cube, qui était 1 à zéro, sera $(1+k)^3$, c'est-à-dire $1+3k+3k^2+k^3$. Or l'allongement k étant fraction très-petite (page 268), son carré k^2 et son cube k^3 sont assez petites pour ne pas influer sur la dernière décimale des représentent les coefficients de dilatation cubique. On peut donc né- en k^2 et en k^3, et le volume à 1 degré devient très-approxi- $1+3k$. L'accroissement de l'unité de volume est donc $3k$, c'est- du coefficient de dilatation linéaire.

aurait de même que le coefficient de dilatation superficielle est ficient de dilatation linéaire.

sure des coefficients de dilatation linéaire, méthode de t Laplace. — De nombreux expérimentateurs se sont mesurer les coefficients de dilatation linéaire, et ont ers appareils à cet usage. Nous décrirons d'abord ce- ervirent Lavoisier et Laplace en 1782.

é en perspective dans la figure 262, et en coupe dans , il se compose d'une cuve de cuivre placée sur un re quatre piliers de pierre. Entre les deux piliers la droite du dessin est un axe horizontal traversé par erre v, et à l'extrémité du même axe est fixé un bras ec lui, et destiné à diriger une lunette L mobile sur . Aux deux autres piliers sont fixées des traverses tiennent fixe une seconde règle de ver

dans la cuve est un bain d'eau ou d'huile, dans lequel on
barre *ac* dont on cherche le coefficient de dilatation.

Cette barre est en contact d'un bout avec la règle de ver
l'autre avec la règle *v*; d'où il résulte qu'elle ne peut s'
que dans le sens *ac*, puisque la règle *r* est invariablement
piliers. De plus, pour qu'elle ne soit pas gênée dans sa di

Fig. 262
($l = 2^m$).

la barre repose sur deux rouleaux de verre. Enfin, dans l
est un fil micrométrique horizontal qui, lorsqu'elle tou
certain angle, parcourt un nombre de divisions correspon
une échelle verticale AB placée à 200 mètres de distance

Cela posé, on mettait d'abord de la glace dans la cuve, et
étant à la température de zéro, les deux tiges *v* et *r* en
avec elle, et la lunette horizontale, on observait à quelle
correspondait le fil de la lunette sur l'échelle AB; puis o
la glace, on remplissait la cuve d'eau ou d'huile, et on c
La barre se dilatait, et lorsque la température était deve
tionnaire, d'un côté on notait la température du bain à
thermomètres qui y étaient plongés, et de l'autre à quelle
de l'échelle correspondait le fil micrométrique de la lun

De ces données, on déduit ensuite l'allongement de la b
effet, celle-ci s'étant allongée d'une quantité *nc*, la rè
repoussée, et entraînant avec elle le bras *m* et la lunet
optique de celle-ci est incliné dans la direction *o*B. Or
triangles *onc* et *o*AB sont semblables comme ayant les c
pendiculaires chacun à chacun, ce qui donne $\frac{nc}{AB} = \frac{on}{oA}$. D
si l'on représente par nc' un autre allongement, et par A
viation correspondante, on a $\frac{nc'}{AB'} = \frac{on}{oA}$. Donc le rapport d

ment de la barre à la déviation de la lunette est constant, puis-
il est toujours égal à $\frac{on}{oA}$. Or, par une expérience préliminaire
avec une seconde barre plus longue que la première d'une
tité connue, on avait constaté que ce rapport était $\frac{1}{744}$. On
it donc $\frac{nc}{AB} = \frac{1}{744}$, d'où $nc = \frac{AB}{744}$; c'est-à-dire que l'allonge-
t total de la barre s'obtenait en divisant par 744 la distance

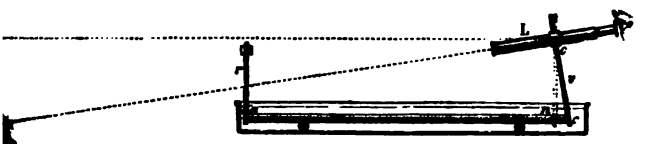


Fig. 263.

me sur l'échelle par le fil micrométrique de la lunette. Une
t allongement connu, en le divisant par la longueur de la
à zéro et par la température du bain, on avait la dilatation
une seule unité de longueur et pour un seul degré, c'est-à-
coefficient de dilatation linéaire.

Méthode de Roy et Ramsden. — Le major Roy, en 1787, fit
de l'appareil représenté dans la figure 264 pour mesurer
oefficients de dilatation linéaire. Cet appareil, construit par
den, se compose de trois cuves métalliques parallèles, de
mètres de longueur environ. Dans celle du milieu est, en
de barre prismatique, le corps dont on cherche le coefficient
atation; dans les deux autres sont des barres de fonte exac-
t de même longueur que la première. Aux extrémités de ces
barres sont adaptées des tiges verticales. Dans les cuves A et
tiges portent de petits disques percés de trous circulaires
quels sont tendus en croix des fils micrométriques, comme
éticules de lunette (572); mais, dans la cuve C, les tiges por-
des tubes renfermant un objectif et un oculaire de micro-
e, munis aussi de réticules.

cuves étant remplies de glace, et les trois barres à zéro, les
de croisement des fils sur les disques et dans les tubes sont
ement en ligne droite à chaque extrémité. On retire alors la
de la cuve centrale seule, et l'on y verse de l'eau qu'on porte
degrés, au moyen de lampes à alcool placées au-dessous de
ve. La barre qui y est contenue se dilate; mais comme elle
contre une pièce fixe en B, tout l'allongement se fait dans le

sens *mn*. Le réticule *m* reste donc en ligne, tandis que le
n avance vers la gauche. Pour qu'on puisse le ramener
premier alignement, sa tige n'est point fixée à la barre,
déplace, dans le sens de la longueur, à l'aide d'une vis

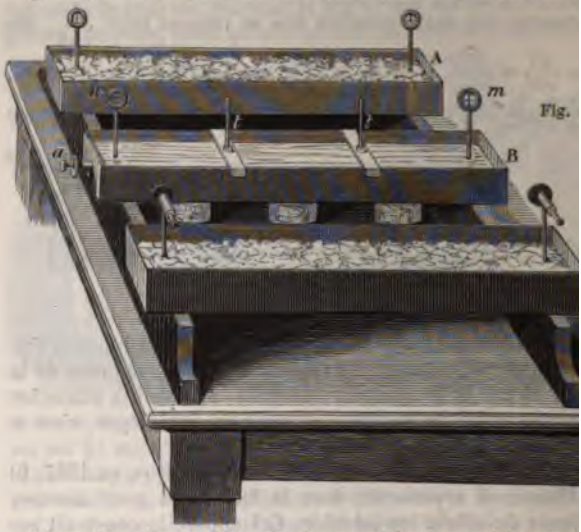


Fig.

a à laquelle elle est liée. En tournant lentement la vis
à droite, on fait avancer la tige jusqu'à ce que le réti
retrouve de nouveau en ligne. Or, à cet instant, la vis
d'une longueur précisément égale à l'allongement de la
comme la longueur dont la vis a avancé se déduit avec u
précision du nombre de tours qu'elle a faits et de son
ainsi la dilatation totale de la barre, d'où l'on déduit e
coefficient de dilatation en divisant par la température d
par la longueur de la barre à zéro.

Ce coefficient est le *coefficient moyen* de dilatation
deux températures extrêmes auxquelles la barre a été p

Coefficients moyens de dilatation linéaire, entre zéro et 100 degrés, les plus employés dans les arts.

Verre blanc	0,000008613	Cuivre rouge	
Platine	0,000008842	Bronze	
Acier non trempé	0,000010788	Cuivre jaune (laiton)	
Fonte	0,000011250	Argent de coupelle	
Fer doux forgé	0,000012204	Étain	
Acier trempé	0,000012395	Plomb	
Or de départ	0,000014660	Zinc	

a détermination des coefficients de dilatation cubique, elation qu'on a vue exister entre eux et les coefficients n linéaire (300), ils se déduisent immédiatement des dessus en les multipliant par 3. Cependant, en traitant *thermomètre à poids*, nous ferons connaître une mé- e par Dulong et Petit pour déterminer directement les de dilatation cubique (315).

coefficients de dilatation augmentent avec la tempéra- xpérience montre que les coefficients de dilatation li- métaux sont sensiblement constants entre zéro et 100 t-à-dire que, pour un même nombre de degrés, on re sans erreur sensible que la longueur augmente con- le la même fraction de ce qu'elle était à zéro. Mais, recherches de Dulong et Petit, le coefficient devient entre 100 et 200 degrés, et croît encore entre 200 et 300 ainsi de suite jusqu'au point de fusion. L'acier trempé son coefficient décroît lorsque la température dé- taine limite.

s relatives aux dilatations des solides. — Soient l la lon- ire à zéro, l' sa longueur à la température t, et k son coefficient laire. La relation qui existe entre ces diverses quantités s'exprime s suivantes.

de longueur, l'allongement correspondant à 1 degré étant k, spond à t degrés est t fois k ou kt; d'où il est l fois kt, ou la. La longueur de la barre, qui était l à zéro, est donc $l+ktl$ ù $l'=l+ktl$ [1].

l en facteur commun dans le second membre, on tire de cette formule

$$l'=l(1+kt) \text{ [2]}.$$

[2] sert à trouver la longueur l' à $t°$, lorsqu'on connaît la longueur livisant les deux membres par $(1+kt)$, on en déduit

$$l=\frac{l'}{1+kt} \text{ [3]}.$$

re formule sert à trouver la longueur à zéro, lorsqu'on connaît $'$ à t.

ns l'égalité [1] on transpose l dans le premier membre, et si l'on x côtés par tl, on a $k=\frac{l'-l}{tl}$ [4], équation qui sert à calculer le dilatation k quand l', l et t sont connus.

de considérer les dilatations linéaires, on considère les dilatations trouve des formules analogues à celles qui précèdent. Pour cela, Nume d'un corps à zéro, V' son volume à t degrés, et D son coeffi- ation cubique, lequel, comme on sait (300), est triple de k; on même raisonnement que ci-dessus,

$$V'=V(1+Dt) \text{ [5]}, \quad \text{et} \quad V=\frac{V'}{1+Dt} \text{ [6]},$$

servent à passer du volume à zéro au volume à t degrés, et réci-

proquement. En remplaçant D par $3k$, on peut aussi les écrire sous la forme

$$V' = V(1+3kt)\ [5], \quad \text{et} \quad V = \frac{V'}{1+3kt}\ [6].$$

Les binômes $1+kt$ et $1+Dt$ se désignent sous les noms, l'un de *binôme dilatation linéaire*, et l'autre de *binôme de dilatation cubique*. Les formules [4] et [5] font voir que les longueurs et les volumes à t degrés sont directement proportionnels aux binômes de dilatation.

305. **Problèmes sur les dilatations.** — I. Une barre de fer a $2^m,6$ de long à zéro; quelle sera sa longueur à 80 degrés, le coefficient de dilatation du fer étant 0,0000122?

Ce problème se résout par la formule [2] ci-dessus, en y faisant

$$l = 2^m,6, \quad t = 80, \quad k = 0,0000122.$$

Ce qui donne $l' = 2^m,6\,(1+0,0000122 \times 80) = 2^m,6025$.

C'est-à-dire que la longueur cherchée est $2^m,6025$, ce qui fait 2 millimètres et demi d'allongement.

II. A 90 degrés, une barre de cuivre a $3^m,4$ de long; quelle sera sa longueur à zéro, le coefficient de dilatation du cuivre étant 0,0000172?

Il faut ici faire usage de la formule [3] du paragraphe précédent, en y faisant $l' = 3^m,4$, $t = 90$, $k = 0,0000172$; d'où l'on déduit

$$l = \frac{3,4}{1+0,0000172 \times 90} = \frac{3,4}{1,001548} = 3^m,395.$$

III. Une barre métallique a une longueur l' à t degrés; quelle sera sa longueur L à t' degrés, son coefficient de dilatation étant k?

Ce problème se résout en cherchant la longueur de la barre à zéro, laquelle est $\frac{l'}{1+kt}$, d'après la formule [3] (304); puis de la longueur à zéro on passe à la longueur à t' au moyen de la formule [2], c'est-à-dire en multipliant par $1+kt'$, ce qui donne enfin pour la longueur cherchée

$$L = \frac{l'(1+kt')}{1+kt}.$$

IV. A la température de t degrés on mesure une longueur donnée avec une règle métallique divisée en millimètres, et l'on trouve que cette longueur contient n divisions de la règle. Celle-ci ayant été divisée à la température de zéro, on demande la correction à faire pour tenir compte de sa dilatation de zéro à t degrés.

Pour cela, remarquons que c'est seulement à zéro que les divisions de la règle valent 1 millimètre; à t degrés, chacune d'elles vaut $1+kt$, k étant le coefficient de dilatation de la règle. Donc, les n divisions obtenues représentent, non n millimètres, mais $n(1+kt)$. Tel est donc le nombre réel de millimètres correspondant à la longueur qu'on a mesurée.

V. La densité d'un corps étant d à zéro, calculer sa densité d' à t degrés.

Si l'on représente par 1 le volume du corps à zéro, et par D son coefficient de dilatation cubique, le volume à t degrés sera $1+Dt$; et comme la densité d'un corps est évidemment en raison inverse du volume que prend le corps en se dilatant, on a la proportion inverse

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{1+Dt}, \quad \text{d'où} \quad d' = \frac{d}{1+Dt}.$$

D'où l'on conclut que, lorsqu'un corps s'échauffe de zéro à t degrés, sa densité *et par suite son poids, à volume égal, varient en raison inverse du binôme dilatation* $1+Dt$.

VI. Le volume d'un ballon de verre est V' à t degrés; quel sera son volume V à zéro?

cette question, on admet qu'un ballon de verre se dilate, pour température déterminée, de la même quantité que se dilate-le verre pleine, de même volume. Si l'on représente alors par e dilatation cubique du verre, et par V le volume du ballon à l'après la formule [5] (204),

$$V' = V + \delta V t = V(1 + \delta t); \text{ d'où } V = \frac{V'}{1 + \delta t}.$$

ations de la dilatation des solides. — La dilatation ffre de nombreuses applications dans les arts. Les rneaux, par exemple, s être encastrées trop xtrémités, mais libres ne, sinon elles descel-es du foyer en se dila-chemins de fer, si les aient, la force de dila-rberait de distance en briserait leurs coussi-on chauffe ou refroidit nent un vase de verre, a est dû à ce que, le auvais conducteur de es parois s'échauffent et, par suite, se di-me, ce qui amène la

Fig. 265.

ule compensateur. — tation des divers mé-ne importante applica-*endule compensateur*. insi un pendule dans gement de la tige, lors-ature s'élève, est com-nière que la distance re de suspension et le illation demeure con-ce qui est nécessaire, s du pendule (64, 3°), chronisme persiste et pour que le pendule puisse ilateur aux horloges (67). De nombreux systèmes ont pour compenser les pendules. Celui que représente dû à Leroy, est généralement adopté.

tème, la lentille L, au lieu d'être soutenue par une st par une suite de châssis dont les verges verticales

sont alternativement d'acier et de laiton. Dans le dessin
les tiges d'acier sont représentées plus colorées : elles son
bre de six, y compris une lame d'acier *b*, qui porte to
dule et se courbe à chaque oscillation ; les autres, au
quatre, sont de cuivre jaune. La tige *i*, qui porte la len
fixée, à sa partie supérieure, à une traverse horizontal
sa partie inférieure, elle est libre, passant dans deux t
driques pratiqués dans les traverses inférieures.

De la manière dont les tiges verticales sont liées ent
des traverses horizontales, il est facile de voir que l'al
des tiges d'acier ne peut s'effectuer que de haut en b
contraire, celui des tiges de cuivre, de bas en haut.
quent, pour que la longueur du pendule reste consta
que l'allongement des tiges de cuivre relève constamm
tille juste de la même quantité dont l'allongement des t
tend à l'abaisser.

Pour arriver à cette condition de compensation, remarquons q
tiges d'acier ne s'ajoutent pas pour l'abaissement de la lentille, m
la lame *b* et les tiges *d*, *e*, *i*. Pour celles-ci, en effet, les allongemen
tandis que les deux tiges d'acier, sur la gauche de la figure, étant
vement aux tiges *d* et *e* par des traverses, leurs allongements son
ceux de ces tiges sans s'ajouter pour l'abaissement de la lentille.
marque s'appliquant aux tiges de laiton, on n'a à considérer que les

Cela posé, représentant par a, a', a'', a''' les longueurs des tiges
e, i, et par c et c' celles des tiges de laiton c, n, posons $a+a'+$
et $c+c'=l'$; ce qui veut dire que l est la longueur réelle d'acier
la descente de la lentille, et l' la longueur de laiton utilisée pour s
Par suite, si l'on représente par L la longueur du pendule, c'est-à-di
du point de suspension au centre d'oscillation (65), on a $L=l-$

Or, K et K′ étant les coefficients de dilatation linéaire de l'acier
jaune, les allongements des deux métaux, à t degrés, sont respe
et $l'K't$. Pour que la longueur L reste constante, il faut donc qu'on a
ou $lK=l'K'$ [2].

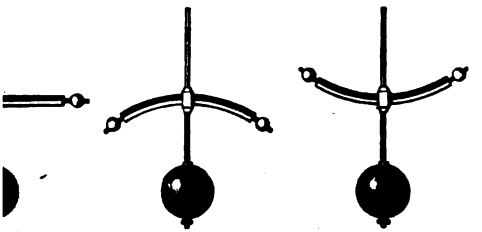
De cette dernière égalité on tire que, *dans le pendule compens
gueurs de l'acier et du cuivre sont en raison inverse des coefficients
de ces métaux*. De plus, cette égalité ne contenant pas t, on en c
compensation a lieu à toutes les températures.

Les pendules des horloges étant ordinairement astreints à batt
L est connue et égale à $0^{m},993866$ (65). Les équations [1] et [2] ci-de
connaître l et l'. En les résolvant, on trouve $l=\frac{L}{1-\frac{K}{K'}}$, et $l'=$

Ces formules font voir que l et l' sont plus grands que L ; c'e
faire à cette condition qu'on est forcé, pour le pendule à seco
usage de plusieurs châssis d'acier et de laiton.

308. **Lames compensatrices.** — On arrive encore à
l'allongement de la tige des pendules au moyen de *lam
satrices*. On nomme ainsi deux lames de cuivre et de

ées à la tige du pendule (fig. 266). La lame de cui-
ns dilatable, est au-dessous de la lame de fer. Lors-
ture baisse, la tige du pendule se raccourcit et la
ve; mais alors les lames compensatrices se recour-
, ce qui est dû à ce que le cuivre se contracte plus



66. Fig. 267. Fig. 268.

la sorte, deux boules métalliques placées à l'extré-
s'abaissent, et, si elles ont une masse convenable,
compensation entre les points qui se rapprochent
ispension et ceux qui s'en écartent, ce qui fait que
illation n'est pas déplacé. Si la température s'élève,
end, mais les boules remontent (fig. 268), et il y a
isation.

CHAPITRE III

DILATATION DES LIQUIDES

ion apparente et dilatation absolue. — Dans les li-
a lieu de considérer que des dilatations cubiques,
n *dilatation absolue* et en *dilatation apparente.*
latation apparente l'accroissement de volume que
de renfermé dans une enveloppe qui se dilate moins
st, dans les thermomètres, la dilatation du mercure
La *dilatation absolue* est l'augmentation réelle que
ne d'un liquide, abstraction faite de toute dilatation
.

n apparente est plus petite que la dilatation absolue
de l'enveloppe. On rend sensible l'influence de la
elle-ci en plongeant dans l'eau chaude un thermomè-
rvoir, rempli, jusqu'à la moitié de sa t

coloré (fig. 269). Au moment où le réservoir entre dans l'eau cool baisse dans le tube de *b* en *a*, ce qui provient évidem de la dilatation des parois; mais si le réservoir continue à pl l'alcool s'échauffe et monte quantité égale à sa dilatati solue, diminuée de celle d veloppe.

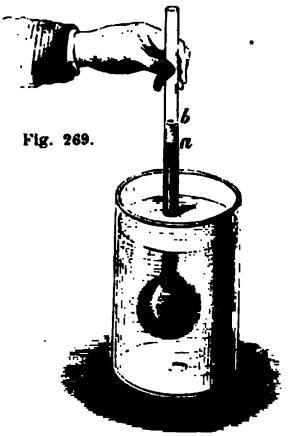


Fig. 269.

De même que pour les s on nomme *coefficient de d tion* d'un liquide l'accrois que prend l'unité de volum que la température s'élève à 1 degré; mais on distingu le *coefficient de dilatation rente* et le *coefficient de dila absolue*. Plusieurs procéd été employés pour déterm deux coefficients. Nous des celui dont ont fait usage et Petit.

310. **Coefficient de dilatation absolue du mercure.** — Pour déter coefficient de dilatation absolue du mercure, il fallait éviter l'influence latation de l'enveloppe; c'est à quoi sont arrivés Dulong et Petit en s'a sur ce principe d'hydrostatique que, dans deux vases communiquants, teurs de deux liquides qui se font équilibre sont en raison inverse de l sités (91), principe qui est indépendant du diamètre des vases, et, pa quent, de leur dilatation.

L'appareil des deux physiciens se composait de deux tubes de verre (fig. 270) réunis par un tube capillaire, et maintenus verticalement sur port de fer KM, qu'on disposait horizontalement à l'aide de vis calant deux niveaux à bulle d'air *m* et *n*. Les deux tubes étaient enveloppés d'un manchon métallique dont le plus petit, D, était rempli de glace l'autre, E, d'huile qu'on chauffait graduellement au moyen d'un fourn la figure représente ouvert pour laisser voir le manchon. Enfin les tube étaient remplis de mercure qui se mettait de niveau quand ils étaient à l température, mais qui s'élevait dans le tube B à mesure qu'on chauffa

Cela posé, soient à zéro, dans le tube A, h la hauteur du mercure a de l'axe du tube horizontal, et d sa densité, et soient h' et d' les même tités pour le tube B à la température t. D'après le principe hydro rappelé ci-dessus, on a $h'd' = hd$. Or $d' = \frac{d}{1+\Delta t}$ (205, prob. v), Δ coefficient de dilatation absolue du mercure; remplaçant d' par sa vale l'égalité ci-dessus, on trouve $\frac{h'd}{1+\Delta t} = hd$; d'où l'on déduit $\Delta = \frac{h'-h}{ht}$

Cette dernière formule fait trouver le coefficient de dilatation absolue cure, lorsqu'on a mesuré les hauteurs h et h' de ce liquide dans les deu ainsi que la température t du bain où plonge le tube B. Dans l'expéri Dulong et Petit, cette température était mesurée par un thermomètre à

dont le mercure se déversait dans une capsule C, et par un thermomètre à Celui-ci consiste en un long réservoir T rempli d'air sec, et terminé par un apillaire qui va plonger dans une cuvette R pleine de mercure. A mesure

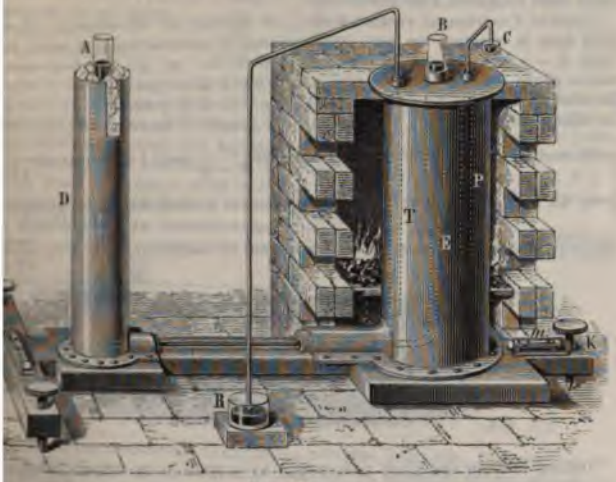


Fig. 270.

température du bain d'huile s'élève, l'air se dilate dans ce thermomètre chappe par le tube. Puis, quand on cesse de chauffer, l'air se contractant, ercure de la cuvette est refoulé dans le réservoir, et si l'on refroidit celui-qu'à zéro dans de la glace, le poids du mercure qui y pénètre fait con-le volume d'air sorti; d'où l'on déduit ensuite la température à laquelle orté le thermomètre, à l'aide de la formule $V' = V(1+\alpha t)$ (320). Quant auteurs h et h', elles se mesuraient au moyen du cathétomètre.

ce procédé, Dulong et Petit ont trouvé que le coefficient de dilatation e du mercure entre zéro et 100 degrés est $\frac{1}{5550}$. Mais ils ont observé que ce ent croît avec la température. Entre 100 et 200 degrés, le coefficient moyen $\frac{1}{}$; entre 200 et 300 degrés, il égale $\frac{1}{5300}$. Le même phénomène se re-35 e pour les autres liquides, ce qui fait voir que ces corps ne se dilatent pas rement. On a constaté que leur dilatation est d'autant plus irrégulière, sont plus près de leur température de congélation ou d'ébullition. Quant rcure, Dulong et Petit ont constaté que, de — 36 à 100 degrés, sa dilata-st très-sensiblement régulière.

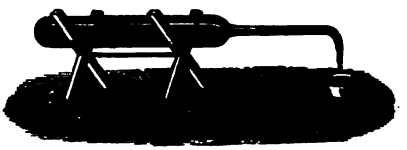
Coefficient de dilatation apparente du mercure. — Le coefficient de lem apparente d'un liquide varie avec la nature de l'enveloppe. Celui du re, dans le verre, a été déterminé par Dulong et Petit, au moyen d'un oir cylindrique de verre auquel est soudé un tube capillaire recourbé à droit et ouvert à son extrémité (fig. 271).

r faire l'expérience, on pèse l'instrument vide, puis rempli de mercure à a différence des deux pesées donne le poids P du mercure contenu dans

l'appareil. Le portant ensuite à une température connue t, le mercure s
et il en sort une certaine quantité qu'on recueille dans une petite co
qu'on pèse. Si l'on représente par p le poids du mercure sorti, celui du
resté dans l'appareil l'est par $P-p$.

Lorsque l'instrument revient à zéro, le mercure se refroidissant, il
duit dans le réservoir un vide qui représente la contraction que subit
cure $P-p$ lorsqu'il se refroidit de t à zéro; ou, ce qui est évidem
même chose, sa dilatation de zéro à t; c'est-à-dire que le poids p re
la dilatation pour t degrés du poids $P-p$. Or, si le poids $P-p$, pris
se dilate, dans le verre, d'une quantité p jusqu'à t degrés, une seule
poids se dilate, dans les mêmes conditions, de $\frac{p}{P-p}$ pour t degrés, et de
pour un seul degré; donc $\frac{p}{(P-p)t}$ représente le coefficient de dilatati
rente du mercure dans le verre. Donc, Δ' étant ce coefficient, on a $\Delta'=$

Fig. 271.



Dulong et Petit ont ainsi trouvé que le coefficient de dilatation
du mercure, dans le verre, est $\frac{1}{6480}$.

312. **Thermomètre à poids.** — L'appareil représenté dans la figure
le nom de *thermomètre à poids*, parce que du poids du mercure sorti
déduire la température à laquelle l'instrument a été porté. En effet, l'
ci-dessus ayant conduit à la formule $\frac{p}{(P-p)t}=\frac{1}{6480}$, on trouve, en fa
paraître les dénominateurs,

$$p\times 6480=(P-p)t, \text{ d'où } t=\frac{p\times 6480}{(P-p)},$$

formule d'où l'on déduit t, lorsque P et p sont connus.

313. **Coefficient de dilatation du verre.** — La dilatation absolu
quide étant égale à sa dilatation apparente, augmentée de la dilatation
veloppe, on a obtenu le coefficient de dilatation cubique du verre en
la différence entre le coefficient de la dilatation absolue du mercure et
sa dilatation apparente, c'est-à-dire que le coefficient de dilatation cu
verre égale $\frac{1}{5550}-\frac{1}{6480}=\frac{1}{38671}=0,00002585$.

M. Regnault a constaté que le coefficient de dilatation varie avec les d
espèces de verre, et, en outre, suivant la forme des enveloppes. Pour
ordinaire des tubes de chimie, ce savant a trouvé que le coefficient est

314. **Coefficient de dilatation des divers liquides.** — Le coefficie
latation apparente des liquides peut se déterminer par le procédé du
mètre à poids (311). Pour avoir ensuite le coefficient de dilatation ab
augmente le coefficient de dilatation apparente du coefficient du verr
découle de la relation qui existe entre les trois coefficients (312).

tations apparentes de quelques liquides, de zéro à 100 degrés, d'après Dalton.

ure.	0,01543	Essence de térébenthine.	0,07.
distillée.	0,0466.	Éther sulfurique.	0,07.
saturée de sel marin. .	0,05...	Huiles fixes	0,08.
e sulfurique	0,06...	Alcool.	0,116
e chlorhydrique.	0,06...	Acide azotique	0,11.

es nombres représentant la dilatation totale de zéro à 100 degrés, il faudrait diviser par 100 pour obtenir la dilatation pour un seul degré, ou le coefficient dilatation; mais les résultats ainsi obtenus ne représenteraient pas le coeffi-t de dilatation moyen des liquides, parce que, ces corps se dilatant très-gulièrement, leur coefficient va toujours croissant à partir de zéro; il y a ption pour le mercure, dont la dilatation, comme on l'a vu ci-dessus, est ulière de — 36 à 100 degrés.

15. Application du thermomètre à poids à la mesure des dilatations iques. — Dulong et Petit ont appliqué la méthode du thermomètre à poids

Fig. 272.

a recherche des coefficients de dilatation cubique. Pour cela, ils prenaient un e de verre un peu gros, et y introduisaient, en forme de prisme allongé, la stance dont ils cherchaient le coefficient, après en avoir déterminé le poids la densité, et par suite le volume. Puis ils étiraient l'extrémité du tube à la ipe et la recourbaient de manière à lui donner la forme d'un thermomètre à ds (fig. 272). Ils remplissaient ensuite de mercure l'espace resté vide dans le e, et déterminaient le poids de ce liquide qui y était contenu à zéro. Cela i, expérimentant comme avec le thermomètre à poids, on portait l'appareil ne température connue t; le mercure et le corps contenus dans le tube se di-nt alors plus que le verre, il sortait un poids p de mercure qu'on pesait, et e restait plus qu'à exprimer, par une équation facile à trouver, que le vo-e du mercure sorti égalait la dilatation du corps, plus celle du mercure, moins e du verre. Comme les dilatations du mercure et du verre étaient connues, on déduisait celle du corps contenu dans le tube.

16. Correction de la hauteur barométrique. — On a déjà indiqué, à l'ar-le Baromètre (150), que pour que les indications de cet instrument soient comparables entre elles, en différents lieux et à différentes saisons, il importe ramener toujours la colonne de mercure à une température constante, qui celle de la glace fondante. Cette correction se fait par le calcul suivant.

a hauteur du baromètre étant H à t degrés, soit h sa hauteur à zéro. Si l'on résente par d la densité du mercure à zéro, et par d' sa densité à t degrés, on (144) que les hauteurs H et h sont en raison inverse des densités d et d', -à-dire qu'on a $\frac{h}{H} = \frac{d'}{d}$ [1]. Mais si l'on représente par 1 le volume du mer-à zéro, son volume à t degrés le sera par $1 + Dt$, D étant le coefficient de ation absolue du mercure. Or on a vu (305, prob. v) que le rapport des mes 1 et $1 + Dt$ est égal au rapport inverse des densités d et d', c'est-à-dire a $\frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + Dt}$ [2]. Cela posé, des égalités [1] et [2] on tire $\frac{h}{H} = \frac{1}{\ldots}$,

d'où $h = \frac{H}{1+Dt}$. En remplaçant D par sa valeur $\frac{1}{5550}$, on a

$$h = \frac{H}{1+\frac{t}{5550}} = \frac{H \times 5550}{5550+t} \text{ [3].}$$

Dans ce calcul on doit prendre le coefficient de dilatation absolue du mercure, et non le coefficient de dilatation apparente, parce que la valeur de H est la même que si le verre ne se dilatait pas, la hauteur du baromètre étant indépendante du diamètre du tube (84), et, par conséquent, de sa dilatation.

Comme application de la formule ci-dessus, soit proposé, la température étant de 25 degrés et la hauteur du baromètre de 0,m75, de calculer la hauteur à zéro.

$$\text{On a } h = \frac{0^m,75 \times 5550}{5550+25} = \frac{4162,5}{5575} = 0^m,746.$$

Dans la formule [3] ci-dessus, on a négligé la dilatation de l'échelle du baromètre. Pour faire cette correction on a vu (305, prob. IV) qu'il faut multiplier le nombre n de divisions observé sur l'échelle par le binôme de dilatation $(1+kt)$. Donc la vraie hauteur du baromètre ramenée à zéro est

$$h = \frac{H(1+kt)}{1+Dt}, \text{ ou } h = \frac{H \times 5550(1+kt)}{5550+t},$$

k étant le coefficient de dilatation de l'échelle.

317. **Maximum de densité de l'eau.** — L'eau offre ce phénomène remarquable que, lorsque sa température s'abaisse, elle se contracte que jusqu'à 4 degrés; au-dessous de ce point, quoique le refroidissement continue, non-seulement la contraction cesse, mais le liquide se dilate jusqu'au point de sa gélation, qui a lieu à zéro; de sorte qu'à 4 degrés l'eau éprouve un maximum de contraction.

Fig. 273.

Pour le vérifier expérimentalement, on fait usage de l'appareil suivant, dû à Hope, physicien écossais. Une éprouvette à pied est percée latéralement de deux trous, l'un à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure, dans lesquels sont les deux thermomètres (fig. 273); un manchon plein de glace, ou d'un mélange réfrigérant, entoure la partie moyenne de l'éprouvette. Or, celle-ci ayant été remplie d'eau à 10 ou 12 degrés, on remarque que, le thermomètre supérieur restant à peu près stationnaire, le thermomètre inférieur s'abaisse rapidement jusqu'à 4 degrés; puis devenant stationnaire à son tour, c'est maintenant

ermomètre supérieur qui descend, non-seulement à 4 degrés, jusqu'à zéro, l'autre étant toujours à 4. On conclut de là que, que l'eau se refroidit jusqu'à 4 degrés, elle va en augmentant nsité, puisqu'elle se rend à la partie inférieure de l'éprou- ; mais qu'en se refroidissant davantage, elle se dilate, puis- le s'élève alors vers la partie supérieure. Donc c'est à 4 degrés le atteint son maximum de densité.

as tard, Hallström pesa successivement, dans de l'eau à dif- ites températures, une boule de verre lestée avec du sable, et, nant compte de la dilatation du verre, il trouva que c'était de l'eau à 4°,1 que la boule perdait davantage de son poids; , suivant lui, c'était à cette température qu'avait lieu le maxi- ı de contraction de l'eau.

spretz, par une autre méthode, s'est assuré que c'est exacte- t à 4 degrés que se produit ce phénomène. Il a fait usage d'un momètre à eau, c'est-à-dire contenant de l'eau au lieu de ure. En le refroidissant graduellement dans un bain dont la érature était donnée par un thermomètre à mercure, et en nt compte de la contraction de l'enveloppe, il a trouvé que à 4 degrés qu'a lieu, dans le thermomètre à eau, le maximum ntraction, et, par suite, le maximum de densité de l'eau.

spretz a construit une table des densités de l'eau de — 9 jus- 100, celle de l'eau à 4 degrés étant prise pour unité. Nous ex- ns de cette table les nombres ci-après, qui suffisent dans les es de température où l'on expérimente dans les laboratoires.

e de l'eau de 0 à 30 degrés, la densité à 4 degrés étant prise pour unité.

é- ures.	DENSITÉS.	TEMPÉ- RATURES.	DENSITÉS.	TEMPÉ- RATURES.	DENSITÉS.
	0,999873	11	0,999640	22	0,997784
	0,999927	12	0,999527	23	0,997566
	0,999966	13	0,999414	24	0,997297
	0,999999	14	0,999285	25	0,997078
	1	15	0,999125	26	0,996800
	0,999999	16	0,998978	27	0,996562
	0,999969	17	0,998794	28	0,996274
	0,999929	18	0,998612	29	0,995986
	0,999878	19	0,998422	30	0,995688
	0,999812	20	0,998213	50	0,988093
	0,999731	21	0,998004	100	0,958634

table fait voir que la densité de l'eau décroît très-irrégulièrement, de degrés, et que, par suite, il en est de même, en sens inverse, de son

coefficient de dilatation. C'est pourquoi il n'y aurait aucune rigueur, dans les calculs, à faire usage du coefficient de dilatation moyen de l'eau entre 0 et 100 degrés; et Δ étant ce coefficient, on ne peut davantage faire entrer dans les calculs le binôme $1+\Delta t$. Mais la densité de l'eau à t degrés étant donnée par la table ci-dessus, on pourra toujours faire usage directement de la formule $P=VD$, pour calculer soit le poids à t degrés d'une masse d'eau dont le volume est connu, soit le volume, si c'est le poids qui est donné.

Par exemple, si l'on veut calculer le poids P d'un volume d'eau V à t degrés, on cherchera dans la table ci-dessus la densité d' de l'eau à t degrés, et le poids, qui serait V à 4 degrés, sera Vd' à t degrés. On a donc $P=Vd'$, V étant exprimé en décimètres cubes, et P en kilogrammes.

318. **Correction des poids spécifiques des solides et des liquides.** — Dans les différentes méthodes qui ont été données pour la détermination des poids spécifiques (105 à 107), on a supposé les corps solides ou liquides à la température de zéro, et l'eau à celle de 4 degrés. Or, en général, ces conditions n'étant pas satisfaites, on a plusieurs corrections à effectuer. Pour cela, considérons le cas où l'on fait usage de la balance hydrostatique, et admettons qu'on fasse la correction de pesées dans l'air (174).

Soient p le poids réel du corps dont on cherche le poids spécifique, d ce dernier, à zéro, K le coefficient de dilatation cubique du corps, t la température de l'air ambiant, et par suite celle du corps et de l'eau distillée sur lesquels on expérimente.

Ayant placé le corps dans l'un des plateaux de la balance hydrostatique, et lui ayant fait équilibre par une tare, soient P les poids gradués qui font équilibre à cette tare, et P' ceux qui lui font équilibre quand le corps est suspendu à la balance et plongé dans l'eau.

Le volume du corps à zéro étant $\frac{p}{d}$, son volume à t degrés est $\frac{p}{d}(1+Kt)$; en supposant les poids p, P et P' mesurés en kilogrammes ou fraction de kilogramme, si a est le poids d'un litre d'air à t degrés et à la pression barométrique pendant les pesées, la perte de poids du corps dans l'air est $\frac{p}{d}(1+Kt)a$, et son poids apparent est $p-\frac{p}{d}(1+Kt)a$, ou $p\left[1-\frac{(1+Kt)a}{d}\right]$ [A].

Or, si l'on représente par D le poids spécifique et par K' le coefficient de dilatation cubique du métal dont les poids P et P' sont formés, on trouve que le poids apparent du corps dont on cherche le poids spécifique est de même représenté par $P\left[1-\frac{(1+K't)a}{D}\right]$ [B].

Égalant les expressions [A] et [B], on a pour première équation

$$p\left[1-\frac{(1+Kt)a}{d}\right]=P\left[1-\frac{(1+K't)a}{D}\right] \quad [1].$$

Passant à la deuxième pesée, celle dans l'eau, on a vu ci-dessus que le volume du corps et par suite celui de l'eau déplacée est, à t degrés, $\frac{p}{d}(1+Kt)$. Cherchant dans la table de Despretz la densité d' de l'eau à t degrés, le produit $\frac{p}{d}(1+Kt)d'$ est le poids réel de l'eau déplacée, et son poids apparent

$$\frac{p}{d}(1+Kt)d'-\frac{p}{d}(1+Kt)a, \text{ ou } \frac{p}{d}(1+Kt)(d'-a) \quad [C].$$

Mais le poids P' de l'eau déplacée, étant diminué de sa perte de poids dans

, devient $P'\left[1-\frac{(1+K't)a}{D}\right]$ [D]; formule qui représente, sous une autre
e, le poids apparent de l'eau. Égalant donc les expressions [C] et [D], on
ur deuxième équation

$$\frac{p}{d}(1+Kt)(d'-a)=P'\left[1-\frac{(1+K't)a}{D}\right] \quad [2].$$

visant membre à membre l'équation [1] par l'équation [2], afin d'éliminer p,
nt inconnu, et supprimant le facteur commun $\left[1-\frac{(1+K't)a}{D}\right]$, il vient

$$\frac{d-(1+Kt)a}{(1+Kt)(d'-a)}=\frac{P}{P'}, \text{ d'où } d=(1+Kt)\left(\frac{Pd'-(P-P')a}{P'}\right).$$

nant à a, on verra que, pour le déterminer rigoureusement, il faut tenir
te non-seulement de la température et de la pression, mais de la vapeur
e contenue dans l'air (389, prob. II).
, au lieu de faire usage de la balance hydrostatique, on employait la méthode
econ, ou celle des aréomètres, la marche à suivre pour les corrections serait
ème.

CHAPITRE IV

DILATATION ET DENSITÉ DES GAZ

19. Méthode de Gay-Lussac pour la dilatation des gaz; sa loi. Les gaz sont les corps les plus dilatables, et en même temps
ux dont la dilatation présente le plus de régularité. De plus, en
nant pour coefficient de dilatation des gaz, de même que pour
solides et les liquides, l'accroissement de l'unité de volume de
0 à 1 degré, on trouve que les coefficients de dilatation des
ers gaz ne diffèrent entre eux que de quantités extrêmement
ites. On a même longtemps admis que tous les gaz se dilataient
alement pour une même variation de température.

C'est Gay-Lussac qui, le premier, posa la loi que *tous les gaz,
nples ou composés, ont le même coefficient de dilatation.* Dal-
n, de son côté, arrivait à la même loi; mais on va voir qu'elle
est qu'approchée.

La figure 274 représente l'appareil dont Gay-Lussac fit usage
ns ses expériences. C'est un tube thermométrique AB, dont la
e est partagée en parties d'égale capacité (276). En pesant suc-
nivement le mercure contenu dans la boule A, et celui contenu
ns la tige, on déterminait le nombre des divisions de celle-ci
ntenues dans la boule. Pour remplir d'air sec la tige et la boule,
y-Lussac les remplissait d'abord de mercure qu'il faisait bouillir
ur chasser l'humidité. Il fixait ensuite l'extrémité de la tige, au
yen d'un bouchon, à un tube plus gros C, rempli de chlorure

de calcium, substance très-avide d'eau. Tenant le système des tubes AB et C dans une direction verticale, le tube C en bas, on introduisait dans celui-ci et dans la tige un fil fin de platine. En l'agitant légèrement, ce fil entraînait des gouttelettes de mercure, lesquelles étaient remplacées par des bulles d'air qui rentraient par le tube C après s'être desséchées sur le chlorure de calcium. La boule et la tige une fois remplies d'air sec, on retirait le fil de platine, en ayant soin de conserver dans la tige une petite colonne de mercure destinée à servir d'index, comme on va le voir ci-après.

On plaçait alors le tube, comme le montre la figure, dans une

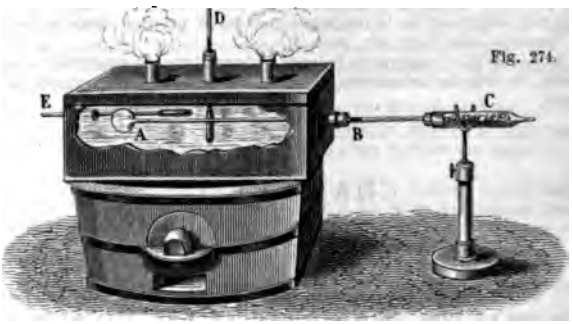


Fig. 274.

caisse de fer-blanc, en faisant passer la tige dans un bouchon adapté à une tubulure latérale, et en conservant le tube à chlorure de calcium pour empêcher la rentrée de l'humidité. La caisse étant d'abord remplie de glace pilée, l'air contenu dans l'appareil se contractait, et l'index de mercure avançait de B vers A. Notant la division de la tige où s'arrêtait l'index lorsqu'il devenait stationnaire, on avait le volume d'air à zéro contenu dans l'appareil. Quant à la pression du gaz, elle était celle marquée par le baromètre au moment de l'expérience. Enfin, retirant la glace et la remplaçant par de l'eau, on plaçait la caisse sur un fourneau, et l'on chauffait graduellement; des thermomètres D, E, plongés dans le bain, en donnaient la température. L'air contenu dans l'appareil s'échauffait alors lentement, l'index avançait de A vers B, et l'on avait soin, pour que tout l'air fût bien à la température du bain, d'enfoncer de plus en plus le tube dans la caisse, à mesure que l'index tendait à sortir de celle-ci. Lorsqu'on arrêtait le feu, en fermant les portes du fourneau, l'index restait stationnaire quelques instants. On notait alors la division correspondante de la tige, et l'on avait ainsi le volume qu'avait pris l'air à la température donnée par les ther-

mètres, et à la pression marquée par le baromètre dans le même moment. En admettant que la hauteur du baromètre soit restée la même pendant toute l'expérience, et en négligeant la dilatation du verre, on a le coefficient de dilatation de l'air par le calcul suivant :

Soient V le volume de l'air contenu dans l'appareil à zéro, et V′ ce que devient le volume à la température t du bain ; $V' - V$ représente évidemment l'accroissement total du volume d'air V lorsqu'il s'échauffe de zéro à t degrés. L'accroissement de volume, pour un seul degré et pour une seule unité de volume, est donc $V'-V$ divisé par t et par V, c'est-à-dire $\frac{V'-V}{V \times t}$. En représentant par α le coefficient de dilatation de l'air, on a donc $\alpha = \frac{V'-V}{Vt}$ [1].

Si la pression atmosphérique a changé, et si l'on tient compte de la dilatation du verre, il y a à faire les corrections indiquées précédemment (159 et 305, rub. VI). Pour cela, soient H la pression à zéro, et H′ la pression à t degrés ; pour ramener le volume V′ à la pression H, il faut, d'après la loi de Mariotte, multiplier par $\frac{H'}{H}$, et la formule ci-dessus devient $\alpha = \frac{V'\frac{H'}{H} - V}{Vt}$ [2]. Or V′ n'est pas le volume réel du gaz à t degrés, il n'est que le volume apparent. Le volume réel est $V'(1+\delta t)$, δ étant le coefficient de dilatation cubique du verre. Portant cette valeur dans la formule [2], il vient enfin

$$\alpha = \frac{V'(1+\delta t)\frac{H'}{H} - V}{Vt}.$$

Par le procédé ci-dessus, Gay-Lussac avait trouvé, pour coefficient de dilatation de l'air, le nombre 0,00375. De plus, comme il a été dit ci-dessus, ses expériences l'avaient conduit à admettre que ce nombre représentait le coefficient de dilatation de tous les gaz. Mais cette loi, remarquable par sa simplicité, n'est pas absolue comme le croyait Gay-Lussac ; toutefois elle est assez approchée pour qu'on puisse l'admettre dans beaucoup de cas, surtout pour des variations de température peu considérables.

Rudberg, M. Regnault et Magnus ont successivement constaté que le nombre de Gay-Lussac est trop grand, et que la vraie valeur du coefficient de dilatation de l'air est 0,003665, ou plus simplement 0,000367. Dans l'expérience de Gay-Lussac il y avait deux causes d'erreur : 1° le gaz n'était pas complétement desséché ; 2° l'index de mercure qui se déplaçait dans le tube ne le fermait pas hermétiquement, l'air extérieur pénétrait dans l'appareil. Nous donnons ci-après (321 et 322) deux méthodes employées par M. Regnault pour déterminer les coefficients de dilatation des gaz, dans lesquelles ces causes d'erreur sont évitées.

Exos. Formules et problèmes sur la dilatation des gaz. — I. Le volume d'un gaz à zéro est V ; quel sera son volume à t degrés, le coefficient de dilatation étant α et la pression étant constante ?

Soit V' le volume cherché; si l'on répète ici le même raisonnement que pour la dilatation linéaire (304), on trouve sans peine

$$V' = V + \alpha V t, \quad \text{ou} \quad V' = V(1+\alpha t) \ [1].$$

II. Le volume d'un gaz est V' à t degrés, quel sera son volume V à zéro, la pression restant constante, et le coefficient de dilatation étant α?

Cette question se résout au moyen de la formule [1] ci-dessus, de laquelle on tire, en divisant les deux membres par $1+\alpha t$,

$$V = \frac{V'}{1+\alpha t} \ [2].$$

III. Connaissant le volume V' d'un gaz à t degrés, calculer son volume V'' à t' degrés, la pression étant la même.

Il faut d'abord réduire le volume à zéro par la formule [2], ce qui donne

$$\frac{V'}{1+\alpha t}.$$

Puis on ramène ce dernier volume de zéro à t' degrés au moyen de la formule [1], et l'on a enfin $V'' = \dfrac{V'(1+\alpha t')}{1+\alpha t}$ [3]

IV. Le volume d'un gaz, à t degrés et à la pression H, est V'; quel sera le volume V de la même masse de gaz à zéro et à la pression $0^m,76$?

Il y a à faire ici deux corrections, l'une relative à la température, l'autre à la pression. Il est indifférent de commencer par l'une ou par l'autre. Si l'on fait d'abord la correction de température, le volume à zéro sera, d'après la formule [2], $\dfrac{V'}{1+\alpha t}$, mais encore à la pression H. On le ramène de cette pression à la pression $0^m,76$, en posant, d'après la loi de Mariotte (156),

$$V \times 0,76 = \frac{V'}{1+\alpha t} \times H, \quad \text{d'où} \quad V = \frac{V'H}{(1+\alpha t)\,0,76} \ [4].$$

Comme application numérique, soit à résoudre la question suivante. Étant donnés 8 litres d'air à 25 degrés et à la pression $0^m,74$, quel sera le volume à zéro et à la pression $0^m,76$?

Si l'on fait d'abord la correction de pression, on a $\dfrac{x}{8} = \dfrac{74}{76}$;

$$\text{d'où} \quad x = \frac{74 \times 8}{76} = 7^{lit},789.$$

Le volume ainsi obtenu est à la pression $0^m,76$, mais encore à 25 degrés; il reste à le ramener à zéro. Pour cela, on fait usage de la formule [2] ci-dessus, ce qui donne, pour le volume cherché,

$$V = \frac{7,789}{1+0,00367 \times 25} = \frac{7,789}{1,0917} = 7^{lit},135.$$

On pourrait aussi directement faire usage de la formule [4], en remplaçant H, V', α et t par leurs valeurs.

V. La densité ou le poids spécifique d'un gaz étant d à zéro, on demande sa densité à t degrés.

Soit d' la densité du gaz à t degrés; si l'on représente par 1 un certain volume de ce gaz à zéro, le volume à t degrés sera $1+\alpha t$. Or les densités étant, à m égale, en raison inverse des volumes (45), on a

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{1+\alpha t}, \quad \text{d'où} \quad d' = \frac{d}{1+\alpha t} \ [1], \quad \text{et} \quad d = d'(1+\alpha t) \ [2].$$

La formule [1] fait voir que la densité à t degrés est en raison inverse de la

se de dilatation $1+\alpha t$. Quant à la formule [2], elle sert à calculer la den-
à zéro, quand on connaît la densité à t degrés.

VI. Un certain volume de gaz à t degrés pèse P', quel sera le poids du même
ume de ce gaz à zéro?

oient P le poids cherché, α le coefficient de dilatation du gaz, d' sa densité
degrés, et d sa densité à zéro. Les poids étant proportionnels aux densités, on
égalité $\frac{P'}{P}=\frac{d'}{d}$. Or on a vu ci-dessus (prob. v) que $\frac{d'}{d}=\frac{1}{1+\alpha t}$; donc

$$\frac{P'}{P}=\frac{1}{1+\alpha t}, \quad \text{d'où} \quad P=P'(1+\alpha t).$$

De cette dernière égalité on tire aussi $P'=\frac{P}{1+\alpha t}$, formule qui fait trouver
poids à t degrés quand on connaît le poids à zéro, et qui montre que le poids
est en raison inverse du binôme de dilatation $1+\alpha t$.

VII. Calculer le poids P d'azote qui serait contenu à 32°, dans un ballon de
rre dont le volume, à zéro, est $12^{lit},3$, le coefficient de dilatation de l'azote étant
0668, le coefficient de dilatation linéaire du verre 0,00000861, et le poids spé-
ique de l'azote 0,9714; on suppose que la pression atmosphérique égale $0^{m},76$.

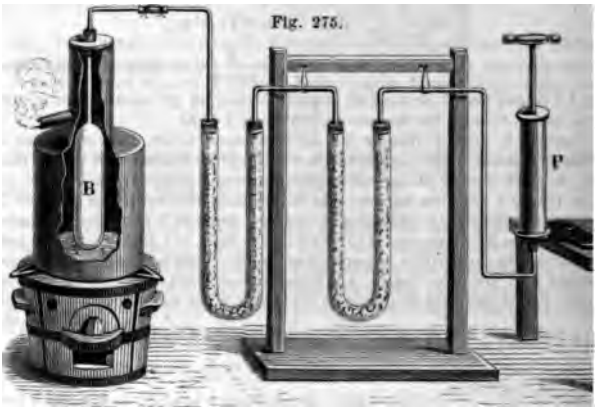
Soient k le coefficient de dilatation linéaire du verre et V le volume du ballon
éro, son volume à t degrés sera $V(1+3kt)$ (305, prob. VI). Pour trouver le poids
azote contenu dans ce ballon, observons qu'un litre d'air à zéro et à la pression
,76 pesant $1^{gr},3$, un litre d'azote, à la même température et à la même pression,
a $1^{gr},3\times0,9714$, puisque le nombre 0,9714 est le poids spécifique de l'azote par
pport à l'air; par conséquent, à t degrés, un litre d'azote pèse $\frac{1^{gr},3\times0,9714}{1+\alpha t}$
(prob. VI), α étant le coefficient de dilatation de l'azote. Donc, enfin, le poids de-
mandé est $\frac{1^{gr},3\times0,9714}{1+\alpha t}\times V(1+3kt)$. Substituant à la place de V, k, t et α leurs
leurs, on trouve $P=13^{gr},911$.

321. Méthode de M. Regnault pour la dilatation des gaz à volume et à pression variables. — M. Regnault a successivement fait usage de plusieurs procédés pour déterminer le coefficient de dilatation des gaz : la force élastique du gaz et son volume étaient variables, ou la force élastique était constante et le volume variable, ou le volume était constant et la pression variable.

Dans la première méthode, la même dont s'était servi Rudberg, mais perfectionnée par M. Regnault, l'appareil se compose d'un réservoir de verre B (fig. 275), dont on a mesuré la capacité en le pesant plein de mercure, et dont on a d'avance déterminé le coefficient de dilatation cubique (313). Un tube de verre à petit diamètre est soudé au réservoir B. Pour remplir ce réservoir d'air parfaitement sec, on le dispose, comme le montre la figure, dans un vase semblable à celui qui sert à prendre le point 100 des thermomètres; puis, au moyen d'un tuyau de caoutchouc, on raccorde le tube capillaire à une suite de tubes en U remplis de fragments de pierre ponce imbibés d'acide sulfurique concentré. Ces tubes vont aboutir à une pompe à main P (188), au moyen de laquelle on fait le vide dans les tubes et dans le réservoir, pendant que ce-

lui-ci est enveloppé de vapeur d'eau à la température de l bouillante. On laisse ensuite rentrer l'air lentement par les t desséchants, puis on fait le vide de nouveau, et ainsi de suite trentaine de fois. De la sorte, on arrive à dessécher comp ment le réservoir et à le remplir d'air parfaitement sec.

Cela fait, on laisse, pendant environ une demi-heure, l'ai



réservoir prendre la température de la vapeur, puis on enlè tubes desséchants, et on ferme à la lampe l'extrémité du tul pillaire, en ayant soin de noter en même temps la hauteur baromètre. Le réservoir B étant refroidi, on le place dans l' reil que représente la figure 276. On l'entoure alors complète de glace pour amener à zéro l'air qu'il contient, et l'on pl l'extrémité du tube dans une cuvette C remplie de mercure. l que le réservoir B est à zéro, on casse avec une petite pince la p *b*; l'air intérieur s'étant condensé, le mercure de la cuvett nètre dans le réservoir par l'effet de la pression atmosphéri et s'élève à une hauteur *o*G telle, qu'ajoutée à la force élast de l'air dans l'appareil, elle fasse équilibre à la pression atmos rique. Pour éviter que de l'air, passant entre le mercure et la roi extérieure du tube, ne soit entraîné avec le mercure et ne nètre dans le réservoir, M. Regnault verse sur le mercure d cuvette une légère couche d'acide sulfurique, et de plus il gage la pointe effilée *b* dans de petits disques de laiton perc leur centre. Ces disques, étant attaqués par le mercure, en s mouillés, et ferment ainsi le passage à l'air.

Pour mesurer la hauteur *h* de la colonne de mercure G*o*,

au moyen d'une vis de pression *m*, une petite tige *go*, ce que la pointe *o* affleure avec la surface du mercure uvette; puis on mesure, au cathétomètre, la différence de entre la pointe *g* et le niveau du mercure en G. Ajoutant fférence la longueur de la tige st connue, on a la hauteur *h*. a ferme la pointe effilée *b* au 'une petite cuiller *a*, qui d'a- été remplie de cire molle, et ut à volonté faire avancer inte *b* jusqu'à ce que celle-ci dans la cire et se bouche. nent, on note la pression in- r le baromètre; en la repré- r H', la pression, dans le , l'est par H' — *h*. ures prises, on retire le de la glace, on l'essuie et e pour obtenir le poids et le volume du mercure qui troduit; ce volume connu, on t celui de l'air à zéro, et le vant donne alors le coeffi- dilatation de l'air.

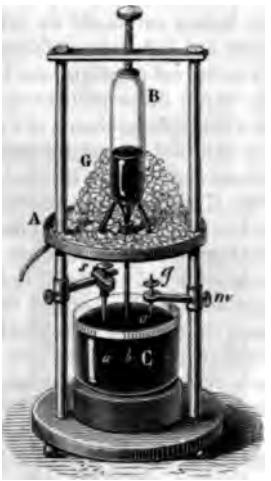


Fig. 276.

à zéro, P le poids du mercure qui passe dans le réservoir et dans le en casse la pointe *b*, P' le poids du mercure qu'ils contiennent, à zéro, nt pleins, D la densité du mercure, δ le coefficient de dilatation cubique nt le réservoir est formé, et α le coefficient de dilatation de l'air; soient, l' la hauteur du baromètre au moment où l'on bouche avec de la cire la tube capillaire, H la hauteur du baromètre quand on ferme l'appareil et *t* la température du réservoir B au même instant. Le volume de ce du tube à zéro est $\frac{P'}{D}$, et ce volume à *t* degrés est $\frac{P'}{D}(1+\delta t)$ (305, prob. VI).

nc aussi le volume d'air à *t* degrés et à la pression H quand on a fermé ramené à la pression 76, ce volume est enfin $\frac{P'(1+\delta t)H}{D.76}$ [1]. D'un le volume d'air dans le réservoir refroidi à zéro est $\frac{P'-P}{D}$ à la pres- . A la pression 76 et à *t* degrés, ce volume devient

$$\frac{(P'-P)(1+\alpha t)(H'-h)}{D.76} \quad [2].$$

lumes représentés par les formules [1] et [2] ne sont autre chose que de l'air contenu dans le réservoir et dans le tube à *t* degrés et à la ; ils sont donc égaux. Par conséquent, en supprimant le dénomina- un, on a l'équation

$$P'(1+\delta t)H = (P'-P)(1+\alpha t)(H'-h) \quad [3],$$

éduit la valeur de α.

n'est pas donnée directement par l'appareil, mais elle est celle de la vapeur de l'eau bouillante dans la chaudière. Or on verra bientôt qu'au moyen des tables des forces élastiques de la vapeur d'eau (348), on déduit de la pression qu'elle supporte sa température. Par conséquent, la hauteur H′ du baromètre à la fin de l'expérience fait connaître la valeur de T. Ayant trouvé les forces élastiques du gaz, à volume égal, à zéro et à T degrés, on obtient son coefficient de dilatation par le calcul suivant.

Le ballon ainsi que les tubes b et c ayant été jaugés d'avance en les pesant pleins de mercure, soient V la capacité du ballon à zéro, v celle des tubes b et c à la température ambiante t pendant la première partie de l'expérience, δ le coefficient de dilatation du verre, et α celui de l'air. Le volume d'air v ramené à zéro devient $\frac{v}{1+\alpha t}$, en négligeant la dilatation du verre, ce qui n'altère pas le résultat, v étant très-petit. Le volume total de l'air, dans la première partie de l'expérience, est donc, à zéro et à la pression H, $V+\frac{v}{1+\alpha t}$.

A la fin de la seconde partie de l'expérience, l'air du ballon étant à T degrés, son volume est $V(1+\delta T)$ à cause de la dilatation du verre, et ramené à zéro ce volume est $\frac{V(1+\delta T)}{1+\alpha T}$. Quant au volume v, en supposant que la température ambiante a changé et est maintenant t', il est, à zéro, $\frac{v}{1+\alpha t'}$. Le volume total de l'air à zéro et à la pression $H'+h$, est donc, dans le second cas,

$$\frac{V(1+\delta T)}{1+\alpha T}+\frac{v}{1+\alpha t'}.$$

Or on a vu (158) que pour une même masse de gaz, à température égale, le produit du volume par la pression est constant. On a donc

$$\left\{V\frac{(1+\delta T)}{1+\alpha T}+\frac{v}{1+\alpha t'}\right\}(H'+h)=\left(V+\frac{v}{1+\alpha t}\right)H.$$

Cette équation a été résolue par la méthode des *approximations successives*. C'est-à-dire que, substituant d'abord à α, dans les deux fractions $\frac{v}{1+\alpha t}$ et $\frac{v}{1+\alpha t'}$, la valeur approchée, déjà connue, du coefficient de dilatation de l'air, et résolvant par rapport au binôme $1+\alpha T$, on en déduisait une seconde valeur de α plus approchée que la première; puis, portant de même cette valeur dans les fractions ci-dessus, on tirait de l'équation une troisième valeur de α plus approchée que la deuxième, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la valeur de α devînt constante.

323. **Dilatation des gaz à pression constante et à volume variable.** — A l'aide d'un appareil qui diffère peu du précédent, M. Regnault a aussi cherché le coefficient de dilatation des gaz à pression constante et à volume variable. Or il a constaté qu'alors la dilatation est toujours un peu plus grande qu'à pression variable et à volume constant.

Le même savant a en outre constaté qu'à une même température et pour un même gaz, la dilatation, sauf celle de l'hydrogène, est d'autant plus grande, que la pression est plus forte, ce qui fait voir que la loi qu'avait donnée Davy, que *le coefficient de dilata-*

les gaz est le même à toutes les pressions, n'est pas exacte. fin, M. Regnault a observé que la différence entre la dilata- à pression constante et celle à pression variable, à peine ble pour l'air, diminue pour les autres gaz à mesure que la rature est plus élevée.

conclut de là et de ce qui a été dit sur la loi de Mariotte (157) à mesure que la température s'élève et que la pression di- e, les gaz approchent d'un *état gazeux parfait*, auquel cor- ndent, pour tous, les mêmes coefficients de dilatation et de ressibilité; en sorte que la loi de Mariotte (156) et celle de Lussac (319) sont d'autant plus rigoureusement applicables, a température est plus élevée et la pression plus faible.

Coefficients obtenus par M. Regnault, entre 0 et 100 degrés, pour variation de température de 1 degré, et sous des pressions constantes, comprises entre 0m,20 et 0m,50.

Hydrogène	0,003661
Oxyde de carbone	0,003669
Air	0,003670
Acide carbonique	0,003710
Protoxyde d'azote	0,003719
Cyanogène	0,003877
Acide sulfureux	0,003903

M. Thermomètre à air. — Le *thermomètre à air*, ainsi que son nom l'in- , est fondé sur la dilatation de l'air. Le plus simple serait le tube capillaire e dont s'est servi Gay-Lussac pour mesurer le coefficient de dilatation des fig. 274). En effet, de même que, la température étant connue, on a déduit lacement de l'index dans le tube le coefficient de dilatation de l'air, récipro- nt, une fois celui-ci connu, il est facile de calculer la température corres- nte à chaque déplacement de l'index. Mais la marche de cet index entraîne- ujours la même cause d'erreur qui a fait trouver à Gay-Lussac un coefficient tation trop grand, et l'on obtiendrait des températures trop élevées. C'est ui on prend de préférence pour thermomètre à air un tube semblable à celui ervi à mesurer le coefficient de dilatation des gaz dans l'appareil de M. Re- (fig. 275 et 276). Opérant avec ce tube comme dans l'expérience du para- 321, on détermine les quantités P, P', H, H' et h qui entrent dans l'équa- l, et comme α et δ sont connus, on déduit de cette équation la température quelle le tube a été porté.

l'emploi de ce thermomètre exige beaucoup de temps et de soins. Aussi momètre à mercure, à tige ou à poids, lui est-il généralement préféré. Ce- t on ne doit pas perdre de vue que les thermomètres à air présentent sur mercure deux avantages importants. 1° Ils sont beaucoup plus sensibles, ant vingt fois plus dilatable que le mercure. 2° Tandis que deux thermo- à mercure sont rarement concordants, sauf de — 36 à 100 degrés (284), deux mètres à air sont toujours comparables entre eux; ce qui découle de la dilatation des gaz, devant laquelle disparaît la faible différence de dila- des diverses espèces de verre dont les thermomètres sont construits.

rès M. Regnault, les thermomètres à air et à mercure sont sensiblement t jusqu'à 240 degrés, quand ils sont construits avec du verre vert ordi- avec le cristal, la discordance est plus grande, et quand le thermomètre à rque 350 degrés, le thermomètre à mercure marque 360°,5.

* 325. **Pyromètre à air.** — Par leur dilatation régulière, les gaz sont les corps qu'on doit préférer pour la mesure des hautes températures; mais pour les appliquer à la construction des pyromètres (293), il est nécessaire que les vases qui les contiennent soient infusibles aux températures que l'on veut mesurer. Pouillet, en 1836, avait adopté pour pyromètre un thermomètre à air dont le réservoir était de platine. Or M. H. Sainte-Claire Deville ayant constaté (168) que ce métal, dans les hautes températures, devient perméable aux gaz, on ne peut en faire usage dans la construction des pyromètres à air. C'est pourquoi le même savant a adopté la porcelaine de Bayeux vernissée, après en avoir déterminé le coefficient de dilatation cubique, lequel il a trouvé être 0,0000165 entre 1000 et 1400 degrés, et s'élever à 0,0000200 en approchant de 1500 degrés.

Ainsi modifié, l'appareil de M. Regnault, décrit ci-dessus (fig. 277), devient un pyromètre à air avec lequel on expérimente identiquement comme on l'a fait (322) pour la détermination de α en fonction de T; seulement ici c'est T qu'on détermine en fonction de α, en admettant que ce coefficient reste constant à toutes les températures.

* 326. **Zéro absolu.** — On a vu (279) que le *zéro absolu* est celui qui correspond à l'absence complète de chaleur dans les corps, c'est-à-dire à la cessation complète de tout mouvement vibratoire des molécules. Pour déterminer à quel nombre de degrés centigrades correspond le zéro absolu, remarquons que le coefficient de dilatation de l'air, 0,00366, équivaut sensiblement à la fraction $\frac{1}{273}$. Cela posé, soient, à la température de zéro centigrade, un volume d'air 1 et F sa force élastique; à t degrés, ce volume sera $1+\alpha t$, et sa force élastique deviendra $F(1+\alpha t)$, les forces élastiques croissant, à volume égal, dans le rapport de 1 à $1+\alpha t$.

Si l'on admet qu'à la température du zéro absolu, l'air soit encore un gaz parfait, c'est-à-dire qu'il ne soit pas liquéfié et soit toujours soumis à la loi de Mariotte, la formule $F(1+\alpha t)$ représente encore sa force élastique. Or celle-ci doit alors être nulle, puisque tout mouvement vibratoire des molécules a cessé. Il faut donc qu'on ait $F(1+\alpha t)=0$; d'où $t=-\frac{1}{\alpha}=-273$, en remplaçant α par sa valeur. C'est donc à 273 degrés au-dessous du zéro centigrade que serait placé le zéro absolu, si alors la loi de Mariotte est encore applicable. Les températures comptées de ce point sont des *températures absolues*.

327. **Poids spécifiques des gaz par rapport à l'air.** — *Le poids spécifique* ou *la densité d'un gaz par rapport à l'air* est le rapport du poids de ce gaz à celui de l'air à volume égal, le gaz et l'air étant tous les deux à zéro et à la pression $0^m,76$.

D'où, pour trouver la densité d'un gaz, il faut chercher le poids d'un certain volume de ce gaz à zéro et à la pression $0^m,76$, puis celui d'un même volume d'air à la même température et à la même pression, et diviser le premier poids par le second. A cet effet, on fait usage d'un ballon de verre de 8 à 10 litres de capacité, dont le col porte un robinet qui peut se visser sur la machine pneumatique (fig. 100, page 108). On pèse ce ballon successivement vide, plein d'air et plein du gaz dont on cherche la densité, l'air et le gaz étant desséchés par le procédé décrit plus haut, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 275. En soustrayant du poids obtenu dans les deux dernières pesées celui du ballon, on a le poids de l'air et le poids du gaz sous le même volume. Dans le cas où, durant ces différentes pesées, la tempé-

re aurait été constamment zéro, et la pression $0^m,76$, il n'y uit qu'à diviser le poids du gaz par le poids de l'air, et le tient serait la densité cherchée. Mais le procédé que nous ve- s de faire connaître nécessite, en général, plusieurs correc- s pour ramener les poids des deux gaz à zéro et à la pression 76, ainsi que pour réduire à zéro le volume du ballon.

ur faire ces corrections, on doit d'abord avoir soin d'opérer sur des gaz secs, l'on obtient en les faisant passer sur des matières desséchantes avant de les dire dans le ballon. L'air doit en outre passer sur de la potasse caustique perdre l'acide carbonique qu'il contient. De plus, comme les meilleures ma- s pneumatiques ne font jamais le vide parfait, afin de ne pas tenir compte, les pesées, du gaz qui reste dans le ballon, on fera le vide à chaque fois jus- ce que l'éprouvette marque la même tension e.

la pesé, on fait le vide dans le ballon, puis on y laisse rentrer de l'air sec; uit de suite plusieurs fois jusqu'à ce que le ballon soit parfaitement dessé- Faisant alors le vide une dernière fois jusqu'à ce que l'éprouvette marque sion e, on pèse, et l'on a le poids p' du ballon lorsqu'il ne contient plus de l'air à la tension e. On laisse alors rentrer l'air lentement à travers des s contenant, les uns du chlorure de calcium, les autres de la potasse; on de nouveau et on trouve que le poids du ballon plein est P'. En appelant H' teur barométrique et t' la température au moment de la pesée, $P'-p'$ ne le poids de l'air contenu dans le ballon à la température t' et à la on $H'-e$.

r ramener ce poids à la pression 760 et à la température de zéro, soient α' ient de dilatation d'air et δ le coefficient de dilatation cubique du verre. n la loi de Mariotte, le poids, qui est $P'-p'$ à la pression $H'-e$, sera, à ion 760, $(P'-p')\frac{760}{H'-e}$, la température étant toujours t'. Or, si celle-ci zéro, la capacité du ballon diminue dans le rapport $1+\delta t'$ à 1, tandis ités du gaz augmente dans le rapport de 1 à $1+\alpha' t'$, ainsi que cela dé- s problèmes VI (305) et V (320). Donc, le poids de l'air contenu dans le zéro et à la pression 760 est

$$(P'-p')\frac{760}{H'-e}\cdot\frac{1+\alpha' t'}{1+\delta t'}\ [1].$$

le même α le coefficient de dilatation du gaz dont on cherche la densité, du ballon plein de ce gaz, à la température t et à la pression baromé- et enfin p le poids du ballon quand on en a retiré le gaz jusqu'à la le poids du gaz contenu dans le ballon, à la pression 760 et à la tem- zéro, sera représenté par

$$(P-p)\frac{760}{H-e}\cdot\frac{1+\alpha t}{1+\delta t}\ [2].$$

a formule [2] par la formule [1], on a, pour la densité cherchée,

$$D=\frac{(P-p)(H'-e)(1+\alpha t)(1+\delta t')}{(P'-p')(H-e)(1+\alpha' t')(1+\delta t)},$$

est indépendante du volume du ballon.

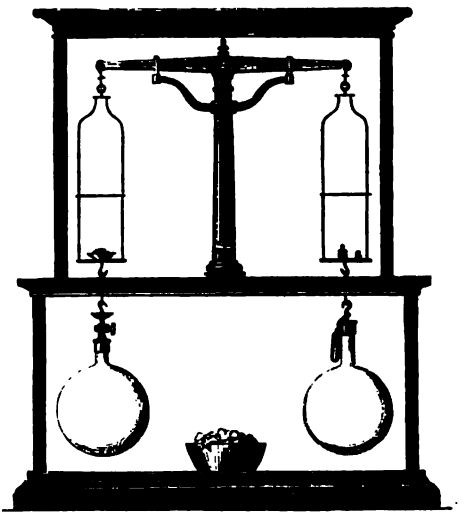
rature et la pression ne varient pas, on a $H=H'$, et $t=t'$; d'où $\frac{(1+\alpha t)}{(1+\alpha' t)}$; et si enfin on suppose $\alpha=\alpha'$, il vient $D=\frac{P-p}{P'-p'}$.

hode de M. Regnault pour trouver la densité des gaz.

méthode ci-dessus, il y a à effectuer de nombreuses M. Regnault les fait disparaître en partie par le pro-

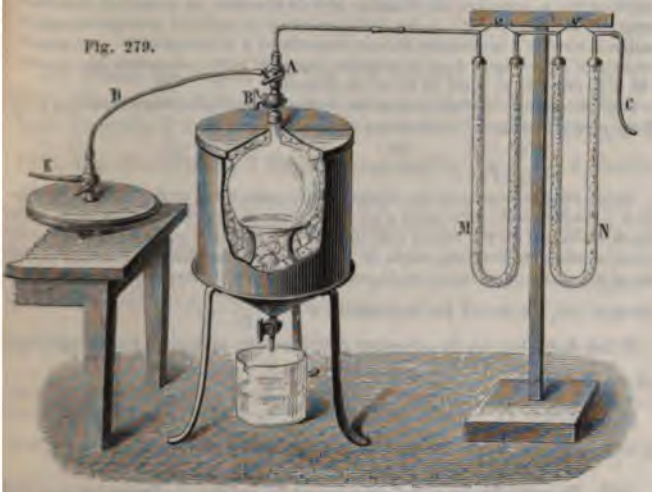
cédé suivant. On prend deux ballons à long col, identiquement de même verre et approximativement de volumes extérieurs égaux; puis on ferme le plus grand par une tubulure à robinet, et le plus petit par une tubulure simplement à crochet. Pour achever de rendre les volumes des ballons identiques, on les remplit d'eau et on les suspend aux plateaux d'une balance, en ayant soin d'é-

Fig. 278.



tablir l'équilibre au moyen d'une tare. Les faisant plonger dans une cuve remplie d'eau, l'équilibre est rompu, et le nombre de grammes q qu'il faut ajouter pour le rétablir représente, en centimètres cubes, la différence des volumes des ballons (98). Construisant alors un tube de verre fermé dont le volume extérieur soit de q centimètres, on le suspend au crochet du plus petit ballon. Après s'être ainsi procuré un système rigoureusement de même volume que le ballon dont on doit faire usage, on expérimente sur celui-ci comme il a été dit plus haut (327), en le pesant successivement vide, plein d'air et plein du gaz dont on cherche la densité. Mais on a soin, dans chaque pesée, de lui faire équilibre avec le deuxième ballon, comme le montre la figure 278. De plus, les deux ballons sont renfermés dans une cage vitrée dont on dessèche l'air avec de la chaux vive. Par cette disposition, les pertes de poids dans l'air étant égales des deux côtés, il est évident qu'il *n'a à faire* aucune correction pour les pesées dans l'air.

Afin d'éviter les corrections de dilatation du verre et des gaz sur lesquels on expérimente, on a soin de remplir le ballon à robinet successivement d'air et de gaz à zéro. Pour cela, le ballon est placé dans un vase plein de glace (fig. 279). Là, on visse sur le robinet B un second robinet A, à trois voies, lequel donne le moyen de faire communiquer à volonté le ballon avec une ma-



hine pneumatique par un tube de caoutchouc D, ou avec des ubes M, N, dans lesquels le gaz est amené par un tube C. Les ubes M, N contiennent différentes substances destinées, les unes dessécher le gaz, les autres à le purifier, c'est-à-dire à retenir es gaz qui pourraient être mélangés avec lui.

Cela fait, le robinet A étant tourné de manière qu'il n'y ait communication qu'avec la machine pneumatique, on fait le vide dans e ballon; puis, à l'aide du même robinet, la communication étant nterrompue avec la machine, mais établie avec les tubes M, N, le az arrive et remplit le ballon. Toutefois, comme on ne peut faire e vide absolu dans celui-ci, et qu'il y reste toujours un peu d'air, n recommence à faire le vide et à laisser rentrer le gaz, et cela lusieurs fois jusqu'à ce qu'on juge que tout l'air est expulsé. aisant enfin le vide une dernière fois, un baromètre différentiel fig. 128, page 139), qui communique avec l'appareil par le tube , fait connaître la force élastique *e* du gaz raréfié qui reste encore dans le ballon. Fermant alors le robinet B et dévissant le ro-

binet A, on retire le ballon de la glace, on l'essuie avec soin, et on le pèse dans la balance décrite ci-dessus (fig. 278).

Ayant obtenu dans cette première pesée un poids p, on place de nouveau le ballon dans la glace, on remet en place le robinet A, et on fait arriver le gaz, en ayant soin de laisser les robinets ouverts assez longtemps pour qu'il prenne dans le ballon la pression extérieure H, marquée par le baromètre. Si l'on ferme alors le robinet B, qu'on enlève A, qu'on retire le ballon de la glace avec les mêmes précautions que la première fois, et qu'on pèse de nouveau, on trouve un poids P, en sorte que la différence $P - p$ des deux pesées est le poids du gaz contenu dans le ballon à zéro et à la pression $H - e$. Nous disons à la pression $H - e$ et non à la pression H, parce que, dans la première pesée, le ballon contenait déjà le même gaz à la pression e, ainsi qu'on a vu ci-dessus.

Pour déterminer le poids x du même volume de gaz à la pression 760, les poids étant proportionnels aux pressions, on a

$$\frac{x}{P-p} = \frac{760}{H-e}, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{760\,(P-p)}{H-e}.$$

Enfin, en recommençant les mêmes pesées avec l'air, c'est-à-dire pesant d'abord le ballon vide, puis plein d'air sec à zéro, et représentant par p' le poids du ballon quand on y a fait le vide jusqu'à la pression e', par P' son poids après qu'on a laissé rentrer l'air, et par H' la hauteur du baromètre à l'instant où l'on ferme le ballon, on trouve que le poids de l'air qui y est contenu, à zéro et à la pression 760, est donné par la formule $x' = \frac{760\,(P'-p')}{H'-e'}$.

Si l'on divise le poids du gaz par le poids de l'air, on obtient pour le poids spécifique cherché

$$D = \frac{x}{x'} = \frac{(P-p)\,(H'-e')}{(P'-p')\,(H-e)}.$$

Si la hauteur du baromètre n'a pas varié, et si dans les deux cas on a fait le vide au même degré, c'est-à-dire si $e = e'$, on a $D = \frac{P-p}{P'-p'}$.

329. **Densité des gaz qui attaquent le cuivre.** — Pour les gaz qui attaquent le cuivre, comme le chlore par exemple, on ne peut se servir d'un ballon à robinet. On fait alors usage d'un flacon à l'émeri, dont on détermine d'avance la capacité en le pesant plein d'eau, et dans lequel on fait arriver le gaz par un tube recourbé qui plonge jusqu'au fond du flacon, celui-ci étant droit ou renversé, selon que le gaz est plus dense que l'air, ou moins dense. Lorsqu'on juge que tout l'air est expulsé, on retire le tube et l'on ferme le flacon. Pesant alors ce dernier plein de chlore, soit P le poids qu'on obtient; soit de même p le poids du flacon plein d'air. La différence $P - p$ est évidemment l'excès du poids du chlore sur celui de l'air à volume égal. Or la capacité du flacon étant connue, on en déduit le poids de l'air qu'il contient, et ce poids, ajouté à la différence $P - p$, est le poids du chlore. Il ne reste donc plus qu'à diviser ce poids par celui de l'air, en ayant soin toutefois de faire les corrections de température et de pression nécessaires pour ramener les deux poids au même volume, à la *température* de zéro et à la pression 760.

tés des gaz à zéro et à la pression 0m,760, celle de l'air étant prise pour unité.

. . . . .	1,0000	Acide sulfhydrique	1,1912
. . . . .	0,0693	Acide chlorhydrique.	1,2472
oéocarboné	0,559 .	Protoxyde d'azote.	1,5269
a.	0,5967	Acide carbonique	1,5290
ane.	0,9569	Cyanogène	1,8064
. . . . .	0,9714	Acide sulfureux.	2,2474
te.	1,0388	Chlore	3,4216
. . . . .	1,1056	Acide iodhydrique.	4,443 .

ls spécifiques des gaz par rapport à l'eau. — On sait poids spécifique de l'air par rapport à l'eau est le quo- ids d'un litre d'air à zéro et à la pression 760 par le litre d'eau à 4 degrés, c'est-à-dire $\frac{1^{gr},293}{1\,000} = 0,001293$. poids spécifiques des autres gaz par rapport à l'eau, on ne en multipliant les densités obtenues ci-dessus par 0,001293. En effet, soient a le poids d'un litre d'air à pression 760, et a' le poids d'un litre d'hydrogène, mes conditions de température et de pression, le poids le l'air par rapport à l'eau est $\frac{a}{1\,000}$, et celui de l'hy- rapport à l'air $\frac{a'}{a}$, c'est-à-dire le nombre 0,0693 con- e tableau ci-dessus. Or le produit de $\frac{a}{1\,000}$ par $\frac{a'}{a}$ est est bien le poids spécifique de l'hydrogène par rap- .

, dans les calculs, du poids spécifique des gaz par rap- offre l'avantage de donner immédiatement en kilo- poids du litre du gaz que l'on considère. Par exemple, cul ci-dessus, si l'on multiplie le nombre 0,0693, qui le poids spécifique de l'hydrogène par rapport à l'air, bre 0,001293, qui est le poids spécifique de l'air par 'eau, le produit $0^{kil},0000896$, ou $0^{gr},0896$, est le poids 'hydrogène à zéro et à la pression 760 millimètres.

CHAPITRE V

CHANGEMENTS D'ÉTAT, VAPEURS

ion, ses lois. — Des divers phénomènes que présentent ous l'influence de la *chaleur*, il n'a été question jus-

qu'ici que de leur dilatation. Or, en ne considérant d'abord que les solides, leur dilatation a une limite. En effet, l'expérience fait voir qu'un corps s'échauffant graduellement, il arrive un moment où la cohésion entre les molécules est vaincue par le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur, et alors un nouveau phénomène se produit : la *fusion*, c'est-à-dire le passage de l'état solide à l'état liquide.

Toutefois, un grand nombre de substances, comme le papier, le bois, la laine, certains sels, ne fondent pas sous l'action d'une température élevée, mais sont décomposées. De tous les corps simples, un seul n'a pu être fondu jusqu'ici par l'action des sources de chaleur les plus intenses : c'est le carbone. Cependant, en le soumettant à l'action d'un courant électrique très-puissant, Despretz est parvenu à ramollir ce corps jusqu'à le rendre flexible, ce qui indique un état voisin de la fusion.

L'expérience fait voir que la fusion des corps est constamment soumise aux deux lois suivantes :

1° *A pression constante, tout corps entre en fusion à une température déterminée, invariable pour chaque substance.*

2° *Quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, du moment que la fusion commence, la température cesse de s'élever et reste égale à celle du point de fusion, jusqu'à ce que celle-ci soit complète.*

Températures de fusion de diverses substances.

Protoxyde d'azote	— 100°	Soufre	+ 111°
Acide carbonique	— 58	Étain	226
Mercure	— 39	Bismuth	264
Brome	— 20	Plomb	320
Glace	0	Zinc	360
Chlorure de calcium hydraté	+ 29	Antimoine	432
Suif	33	Bronze	900
Phosphore	44	Argent	1000
Acide margarique	57	Fonte blanche	1100
Potassium	58	Fonte grise	1200
Stéarine	60	Palladium	1300
Cire jaune	61	Or	1300
Cire blanche	69	Acier	1300
Acide stéarique	70	Fer doux	1400
Sodium	90	Platine	1910 à 2000
Alliage de Darcet (1 de plomb, 1 d'étain, 4 de bismuth)	94	Iridium	2000

M. Hopkins, en Angleterre, a constaté que la température de fusion s'élève à mesure que la pression augmente. Les corps sur lesquels il a expérimenté sont le soufre, la cire, la stéarine et le spermaceti. M. W. Thomson a observé le contraire pour la glace, *dont le point* de fusion s'abaisse lorsque la pression croît. D'où

l'on voit que *la température de fusion, pour un même corps, varie avec la pression.*

332. **Chaleur latente.** — On a vu (331, 2°) que, lorsqu'un corps passe de l'état solide à l'état liquide, sa température reste constante et égale à celle du point de fusion pendant toute la durée du phénomène, et cela quelle que soit l'intensité de la source de chaleur. On conclut de là que la chaleur communiquée au corps, pendant la fusion, est tout entière consommée pour donner aux molécules l'orientation et le mouvement vibratoire nécessaires à la fluidité, en un mot, pour leur communiquer une nouvelle force vive (270). Cette chaleur, qui se résout ainsi en travail intérieur, est donc perdue en tant que *chaleur sensible;* c'est pourquoi on lui donne le nom de *chaleur latente,* ou mieux celui de *chaleur de fusion.*

L'expérience suivante est propre à donner une idée exacte de ce qu'il faut entendre par chaleur latente. Si l'on mélange d'abord 1 kilogramme d'eau à zéro avec le même poids d'eau à 79 degrés, on a immédiatement 2 kilogrammes d'eau à 39 degrés $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire à une température moyenne entre celles des deux liquides mélangés; ce qu'il était facile de prévoir, puisque tous les deux étaient de même nature et en quantité égale. Mais si l'on mélange 1 kilogramme de glace pilée avec un égal poids d'eau à 79 degrés, la glace se fond aussitôt, et l'on obtient 2 kilogrammes d'eau à zéro. On voit par là que, sans changer de température, et uniquement pour se fondre, 1 kilogramme de glace absorbe la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 79 degrés 1 kilogramme d'eau. Cette quantité de chaleur représente donc la chaleur de fusion de la glace, ou la chaleur latente de l'eau.

Chaque liquide a une chaleur latente propre; on verra bientôt comment on la détermine par l'expérience (400).

333. **Dissolution.** — Un corps se *dissout* lorsqu'il se liquéfie par l'effet de l'attraction qui s'exerce entre ses molécules et celles d'un liquide. La gomme arabique, le sucre, la plupart des sels, se dissolvent dans l'eau.

Pendant la dissolution, de même que pendant la fusion, il y a disparition d'une quantité plus ou moins considérable de chaleur à l'état latent. C'est pourquoi la dissolution d'un sel détermine, en général, un abaissement de température. Cependant, pour certaines dissolutions, la température ne s'abaisse pas, et même s'élève. On s'en rend compte en observant qu'il se produit ici deux effets simultanés et contraires. Le premier est le passage de l'état solide à l'état liquide, effet qui entraîne un abaissement de température; le second est la combinaison du corps dissous avec le liquide. Or

toute combinaison chimique se fait avec dégagement de chaleur. Par suite, suivant que c'est l'un des deux effets qui prédomine, ou suivant qu'ils sont égaux, il y a production de froid ou de chaleur, ou la température reste constante.

334. **Solidification; ses lois.** — La *solidification*, ou *congélation*, est le passage de l'état liquide à l'état solide. Ce phénomène est toujours soumis aux deux lois suivantes, qui sont les réciproques de celles de la fusion, et qui se constatent par l'expérience :

1° *La solidification se produit, pour chaque corps, à une température fixe, qui est précisément celle de la fusion.* Toutefois, on verra ci-après (338) que plusieurs causes peuvent abaisser la température de solidification.

2° *Du moment que la solidification commence, jusqu'à ce qu'elle soit complète, la température du liquide reste constante.*

Cette dernière loi fait voir que la chaleur disparue pendant la fusion reparaît au moment de la solidification.

Il est des liquides, comme l'alcool, l'éther, qui ne se solidifient pas par les plus grands froids auxquels on ait pu les soumettre. Cependant, par un froid produit à l'aide d'un mélange de protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide et d'éther, Despretz a vu l'alcool prendre une consistance telle, que le vase qui le contenait a pu être renversé sans que le liquide s'écoulât.

335. **Cristallisation.** — Généralement, les corps qui passent lentement de l'état liquide à l'état solide affectent des formes géométriques déterminées qu'on nomme *cristaux*, telles que celles de tétraèdres, de cubes, de prismes, de rhomboèdres. Si c'est un corps en fusion, comme le soufre, le bismuth, qui se solidifie, on dit que la cristallisation se fait par *voie sèche;* mais si c'est un corps tenu en dissolution dans un liquide, on dit que la cristallisation se fait par *voie humide*. C'est en laissant évaporer lentement les liquides qui tiennent des sels en dissolution que ceux-ci cristallisent. La neige, la glace naissante, les sels, nous offrent des exemples de cristallisation.

336. **Formation de la glace.** — L'eau distillée se solidifie à zéro, et prend alors le nom de *glace;* toutefois plusieurs causes peuvent retarder la congélation de l'eau (338).

La glace offre ce phénomène remarquable, qu'elle est moins dense que l'eau. On a déjà vu, en effet, que, par le refroidissement, l'eau ne se contracte que jusqu'à 4 degrés (317); à partir de ce point jusqu'à zéro, elle se dilate. Or cet accroissement de volume persiste et augmente encore au moment de la congélation, et l'on trouve que le volume de la glace à zéro est 1,075 fois celui *de l'eau à 4 degrés*. Par le fait de cette dilatation, la densité de la

ne bombe remplie d'eau, après en avoir fermé soli-
ière au moyen d'un tampon de bois. Au moment de
, ce tampon fut lancé avec force à une grande dis-
urrelet de glace s'accumula sur les bords de l'orifice.
pas la seule substance qui augmente de volume en
La fonte de fer, le bismuth, l'antimoine, présentent
omène. Au contraire, d'autres substances, comme
phosphore, le soufre, la stéarine, la cire, se con-
ment de la solidification.

tion de la glace. — La *regélation* de la glace est le
e présentent deux morceaux de glace de se souder
dès qu'on les met en contact, même lorsqu'ils flot-
'eau assez chaude pour qu'on ne puisse y tenir la
, le premier, en 1850, signala la regélation de la
elle a été étudiée par Forbes, Thomson, Tyndall,
hypothèses ont été proposées pour l'expliquer.
observe qu'un morceau de glace étant en fusion, les
sa surface, d'un côté, sont libres et en dehors de
tive des molécules voisines; mais si l'on met en con-
ces en fusion, ces surfaces se trouvant transportées
au centre de la glace, leurs molécules, qui perdent la
er à l'état liquide, se mettent en équilibre de mou-
es molécules environnantes, et de là regélation.
t la promptitude avec lesquelles deux fragments de
nt ensemble permettent de mouler une masse don-

338. **Surfusion, causes qui la produisent.** — On donne le nom de *surfusion* au phénomène de l'abaissement du point de solidification des liquides au-dessous de leur température normale de congélation. C'est dans l'eau qu'on l'a d'abord observé, mais il se rencontre aussi dans d'autres liquides. Les causes qui le produisent sont : les substances dissoutes, la privation d'air ou d'autres gaz en dissolution, une complète immobilité, une vive agitation et un excès de pression.

1° L'influence des sels en dissolution se manifeste dans l'eau de mer, qui ne se congèle qu'à — 2°,5. De même, si l'on fait bouillir une dissolution saturée de sulfate de soude dans un tube de verre effilé, afin d'en chasser l'air, puis qu'on ferme à la lampe pour empêcher la rentrée de l'air, la dissolution se refroidissant, le sel ne cristallise pas, quoiqu'il y ait saturation. Mais si l'on brise la pointe du tube, l'air rentre, et aussitôt le sel cristallise.

2° Dans l'expérience ci-dessus, il y a, à la fois, influence de la substance dissoute et de la privation d'air. Or il suffit que l'eau soit purgée d'air et complétement immobile, pour que son point de congélation soit abaissé de plusieurs degrés. En effet, Gay-Lussac ayant mis une éprouvette remplie d'eau distillée dans un mélange réfrigérant, et ayant placé le tout sous le récipient de la machine pneumatique, afin que l'air se dégageât, vit l'eau descendre jusqu'à — 12 degrés et même au delà sans se solidifier. Mais si alors on imprime à sa masse un léger ébranlement, une partie du liquide se congèle aussitôt, et l'on observe ce phénomène remarquable, que la masse restée liquide remonte subitement à zéro. Cette élévation de température fait voir que la force vive communiquée aux molécules dans le passage de l'état solide à l'état liquide, se transforme en chaleur dans le passage inverse.

3° Le soufre, qui fond et se congèle à 111 degrés, reste liquide jusqu'à la température ordinaire, lorsqu'il se refroidit lentement et en repos. De même, le phosphore, qui se solidifie à 44 degrés, reste liquide jusqu'à 22 degrés dans de l'eau parfaitement tranquille. A cet état, si l'on touche le phosphore en fusion avec un morceau de phosphore solide, la solidification commence aussitôt au point de contact et gagne rapidement toute la masse. M. Gernez a observé qu'on détermine encore la solidification de toutes les substances qui subissent la surfusion, en frictionnant dans la masse en fusion deux corps solides entre eux, ou un corps solide contre les parois des tubes dans lesquels sont les corps en fusion.

4° Une agitation rapide peut aussi s'opposer à la congélation. Il en est de même de toute action qui, gênant les molécules *leur mouvement*, ne leur permet pas de se grouper dans les

nécessaires à l'état solide. C'est ainsi que Despretz a pu , dans des tubes très-capillaires, de l'eau jusqu'à — 20 ms qu'elle se congelât. Cette expérience peut servir à expli- nment les plantes, dans de certaines limites, résistent à la s vaisseaux qui contiennent la séve étant très-capillaires. In, une forte compression empêche la congélation de l'eau, L. Boussingault a constaté, dans l'hiver de 1870-71, avec a d'acier dont les parois, de 8 millimètres d'épaisseur, nt supporter des pressions de plusieurs centaines d'atmo- .Une bille d'acier était placée à l'intérieur, et le canon nment rempli d'eau était fermé hermétiquement par une nsion. Tout le système étant resté trois jours et trois posé à un froid de — 12 à — 20 degrés, le tintement de lorsqu'on agitait le canon, indiqua toujours que l'eau per- l'état fluide; ce qui s'explique par la résistance que l'eau ait à la dilatation qui précède sa congélation.

Mélanges réfrigérants. — La disparition de la chaleur à ent, dans les corps qui passent de l'état solide à l'état li- 32), a été utilisée pour produire des froids artificiels plus s intenses. Ce résultat s'obtient en mélangeant des sub- qui ont de l'affinité les unes pour les autres, et dont une s est solide : par exemple, de l'eau et un sel, de la glace l, un acide et un sel. L'affinité chimique accélérant alors , la portion qui se fond enlève au reste du mélange une quantité de chaleur qui devient latente; d'où résulte un ent de température quelquefois très-considérable.

leau suivant indique les proportions et la nature des sub- à employer pour obtenir un froid déterminé.

SUBSTANCES.	PARTIES en poids.	REFROIDISSEMENT
de soude	8	+ 10 à — 17°
hlorhydrique	5	
lée ou neige.	2	+ 10 à — 19°
ta.	1	
de soude.	3	+ 10 à — 19°
notique étendu.	2	
de soude	6	+ 10 à — 26°
d'ammoniaque	5	
notique étendu	4	
te de soude	9	+ 10 à — 29°
notique étendu.	4	
e de calcium en poudre.	4	+ 10 à — 51°
lée ou neige	3	

Les mélanges réfrigérants sont fréquemment utilisés en chim en physique, dans l'industrie et dans l'économie domestique. fabrique, sous le nom de *glacière des familles*, un petit appa pour obtenir de la glace en toutes saisons, au moyen d'une solution de sulfate de soude dans l'acide chlorhydrique : 6 k grammes de ce sel et 5 d'acide suffisent pour donner 5 à 6 k grammes de glace en une heure. L'appareil consiste en un cylin métallique divisé en quatre compartiments concentriques. centre est l'eau à congeler; dans le compartiment suivant, le lange réfrigérant; le troisième contient encore de l'eau; et e dans le compartiment extérieur, est un corps peu conducteur, que du coton, destiné à s'opposer au passage de la chaleur vient de l'extérieur. Le meilleur moyen d'utiliser un mélange frigérant est de ne le former que successivement.

VAPEURS, MESURE DE LEUR TENSION

340. **Vaporisation, vapeurs.** — L'action de la chaleur sur la tière n'a pas seulement pour effet de la faire passer de l'état lide à l'état liquide (331), mais de l'état liquide à l'état de flu aériforme. Ce phénomène se désigne sous le nom général de *porisation*, et l'on donne le nom de *vapeurs* aux fluides aé formes ainsi produits.

Dans le cas où les vapeurs ne se forment que lentement à surface des liquides, on dit qu'il y a *évaporation*, tandis que désigne sous le nom d'*ébullition* la production rapide de vapeu dans la masse même d'un liquide.

On appelle liquides *volatils* ceux qui possèdent la propriété passer à l'état aériforme, et liquides *fixes* ceux qui ne donnent vapeurs à aucune température : telles sont les huiles gras Pour certains liquides, on observe une limite de température vaporisation; par exemple, on verra (352) que l'acide sulfu ne donne plus de vapeurs au-dessous de 30 degrés. Pour d'a liquides, comme l'alcool, l'éther, le sulfure de carbone, o connaît point de limite à la vaporisation.

Il est des corps solides, comme la glace, l'arsenic, le cam et les matières odorantes, qui donnent immédiatement des vap sans passer par l'état liquide. A une température suffisamment vée, tous les métaux se vaporisent.

Les vapeurs sont transparentes comme les gaz, et généralem incolores; il n'y a qu'un petit nombre de liquides colorés dont vapeurs soient elles-mêmes colorées.

341. **Force élastique des vapeurs.** — Comme les gaz, les vapeu

force élastique, en vertu de laquelle elles exercent sur
is des vases qui les contiennent des pressions plus ou
nsidérables. Pour démontrer la tension des vapeurs, on
e mercure à moitié un tube de verre recourbé en siphon
); puis, ayant fait passer une goutte d'éther dans la courte

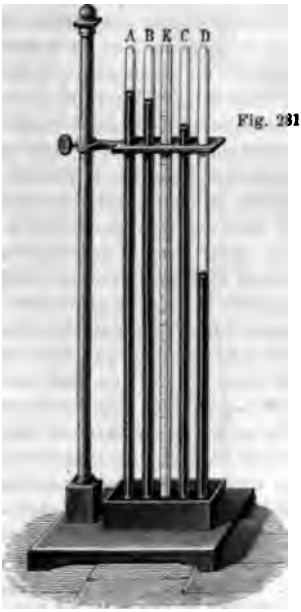


Fig. 231.

qui est fermée, on plonge le tube dans un bain d'eau à
environ. Le mercure s'abaisse alors lentement dans la
nche, et l'espace *ab* se remplit d'un gaz dont la force
fait évidemment équilibre à la colonne de mercure *cd*
ession atmosphérique qui s'exerce en *d*. Or ce gaz n'est
se que de la vapeur d'éther. Si l'on refroidit l'eau du
si l'on retire le tube du bain, ce qui produit le même
apeur qui remplit l'espace *ab* disparaît rapidement, et
d'éther se reforme. Si, au contraire, on chauffe davan-
du bain, le niveau du mercure descend au-dessous du
e qui indique un accroissement de tension.

rmation des vapeurs dans le vide. — Dans l'expérience
e, le passage à l'état de vapeur ne s'opère que lente-

ment. Il en est encore de même lorsqu'un liquide volatil est expo librement à l'air. Dans les deux cas, la pression atmosphériq est un obstacle à la vaporisation; mais il n'en est plus ainsi lor que les liquides sont placés dans le vide. La force élastique d vapeurs ne rencontrant alors aucune résistance, leur formati est instantanée. Pour le démontrer, on fait plonger plusieurs tub barométriques dans une même cuvette (fig. 281). Ces tubes éta remplis de mercure, on en conserve un, le tube A par exempl pour servir de baromètre, puis on introduit quelques gouttes d'eau, d'alcool et d'éther, respectivement dans les tubes B, C, l On remarque qu'à l'instant même où, dans chacun de ces tube le liquide pénètre dans le vide barométrique, le niveau du me cure s'abaisse, comme le montre la figure. Ce n'est pas le poi du liquide introduit qui déprime le mercure, car ce poids n'e qu'une fraction très-petite de celui du mercure déplacé. Il y donc eu, pour chaque liquide, une production instantanée de v peur, dont la force élastique a refoulé la colonne mercurielle.

L'expérience ci-dessus montre, en outre, que la dépression d mercure n'est pas la même dans les trois tubes; elle est plus grand dans le tube à alcool que dans celui où est l'eau, et plus grand dans le tube à éther que dans les deux autres. On peut donc, dès à présent, poser les lois suivantes sur la formation des vapeurs

1° *La pression ralentit la vaporisation.*

2° *Dans le vide, les liquides se vaporisent instantanément.*

3° *A température égale, les vapeurs de liquides différents n possèdent pas la même tension.*

Par exemple, à 20 degrés, la tension de la vapeur d'éther est peu près 25 fois plus grande que celle de la vapeur d'eau.

343. **Vapeurs à l'état de saturation, maximum de tension.** - Lorsque dans le tube d'un baromètre on introduit un liquide v latil, tel que l'éther, si la quantité en est très-petite, elle se vap rise instantanément d'une manière complète, et la colonne d mercure n'atteint pas la plus grande dépression qu'elle est su ceptible d'éprouver; car, si l'on introduit de nouveau une très-p tite quantité d'éther, on voit la dépression augmenter. Or, en co tinuant ainsi, il vient un moment où l'éther qui pénètre dans l tube cesse de se vaporiser et reste à l'état liquide. Il y a donc pour une température déterminée, une limite à la quantité de v peur qui peut se former dans un espace donné. C'est ce qu'on e prime en disant que cet espace est alors *saturé*.

En outre, du moment que la vaporisation de l'éther cesse, la d pression du mercure s'arrête. Il y a donc aussi une limite à la te sion de la vapeur, limite qui, ainsi qu'il sera démontré (346

ie la température, mais qui, pour une température don-
indépendante de la pression.
re voir que, dans un espace fermé, saturé de vapeur et
du liquide *en excès*, la température restant constante,
maximum de tension que la
peut dépasser, quelle que
sion, on fait usage d'un tube
que, plongeant dans une cu-
fonde (fig. 282). Ayant fait
s ce tube, d'abord rempli de
me quantité d'éther suffisante
après que la chambre baro-
s'est saturée, il reste encore
en excès, on note la hauteur
re dans le tube au moyen
lle graduée sur le tube même.
n'on plonge alors le tube da-
ce qui tend à comprimer la
oit qu'on le soulève, ce qui
ilater, la hauteur de la colonne
le reste constante. La tension
eur reste donc la même dans
cas, puisque la dépression
te ni ne diminue. On conclut
, lorsque la vapeur contenue
space saturé est comprimée,
retourne à l'état liquide; et
contraire, la pression dimi-
portion du liquide resté en
aporise, et l'espace occupé par
se sature de nouveau; mais,
et l'autre cas, la tension et la
la vapeur restent constantes.

Fig. 282.

peurs non saturées. — D'après ce qui précède, les va-
résentent sous deux états bien distincts, suivant qu'elles
on saturées. Dans le premier état, celui de saturation,
elles sont en contact avec leur liquide, elles diffèrent
nent des gaz, puisque, pour une température donnée,
peuvent être ni comprimées ni dilatées, leur force élas-
eur densité restant constantes.
nd état, au contraire, les vapeurs non saturées, non en
vec leur liquide, sont tout à fait comparables aux gaz,
possèdent toutes les propriétés. En effet, si l'on répète

l'expérience ci-dessus (fig. 282), en n'introduisant dan qu'une très-petite quantité d'éther, afin que la vapeur qui n'atteigne pas l'état de saturation, et si l'on soulève alo ment le tube, le niveau du mercure monte, ce qui ind la force élastique de la vapeur a diminué. De même, en e le tube davantage, le niveau du mercure s'abaisse. La v comporte donc ici entièrement comme un gaz, sa tensi nuant quand le volume augmente, et réciproquement; et dans les deux cas, on observe que le volume que prend l est en raison inverse de la pression, on en conclut qu *peurs non saturées sont soumises à la loi de Mariotte.*

Enfin, en chauffant une vapeur non saturée, on rema son accroissement de volume est de même ordre que celui et que le nombre 0,00367, qui représente le coefficient d tion de l'air, peut être pris sensiblement pour celui des

On voit donc que les vapeurs non saturées sont tout à l parables aux gaz, et qu'on peut leur appliquer toutes les l relatives à la compressibilité et à la dilatabilité de ces (159 et 320). Mais il ne faut pas oublier qu'il y a toujour mite de pression ou de refroidissement pour laquelle les non saturées passent à l'état de saturation, et qu'elles c un maximum de tension et de densité qui ne peut être qu'autant que les vapeurs étant en contact avec leur liqui température s'élève.

345. **Tension de la vapeur d'eau au-dessous de zéro.** — I surer la force élastique de la vapeur d'eau au-dessous Gay-Lussac s'est servi de deux tubes barométriques re mercure et plongeant dans une même cuvette (fig. 28 d'eux, qui est droit et purgé d'air et d'humidité, sert à la pression atmosphérique; l'autre est recourbé de manièr partie de la chambre barométrique plonge dans un mél frigérant (339). Cela posé, si l'on fait passer un peu d'eau tube recourbé, on remarque que le niveau du mercure tube est plus bas que dans le tube A d'une quantité qui v la température du mélange réfrigérant.

A 0° la dépression est, en millimètres	4,60
— 10	1,96
— 20	0,84
— 30	0,30

Ces dépressions, dues à la tension de la vapeur dans bre barométrique BC, montrent qu'à des températures ses, il y a encore de la vapeur d'eau dans l'air.

Dans l'expérience ci-dessus, la partie B et la partie

e barométrique où est la vapeur ne participent pas toutes
x à la température du mélange réfrigérant; mais on verra
(351) que la tension de la vapeur est la même dans les
t correspond à la plus basse des deux températures.

Tension de la vapeur d'eau entre zéro et 100 degrés. — *Procédé de Dalton.* — Dalton a mesuré la force élastique de la

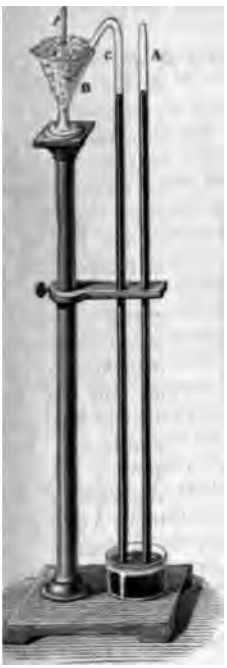


Fig. 283.

Fig. 284 (h=1m,07).

, de zéro à 100 degrés, au moyen de deux tubes baromé-
A et B (fig. 284) plongeant dans une marmite de fonte
le mercure et placée sur un fourneau. Le baromètre B est
lement purgé d'air et d'humidité, et dans le baromètre A
passer une petite quantité d'eau. Ces deux baromètres sont
ns dans un manchon de verre rempli d'eau, et au centre
anchon plonge un thermomètre T, qui donne la tempéra-
liquide. En chauffant graduellement la marmite, et, par
'eau du manchon, celle qui est dans le tube A se vaporise,

et, à mesure que la tension de la vapeur augmente, le mercure s'abaisse. On note alors, de degré en degré, sur une échelle E, la dépression qui a lieu dans le tube A, au-dessous du niveau B, en ayant soin, à chaque observation, de ramener à zéro la hauteur du mercure dans les tubes (316). Les différences de niveau observées font connaître les tensions. C'est en opérant ainsi que Dalton, le premier, a construit une table des forces élastiques de la vapeur d'eau de zéro à 100 degrés.

2° *Procédé de M. Regnault, de* 0 *à* 50 *degrés.* — L'appareil de Dalton offre peu de précision, car le liquide du manchon ne peut être entretenu exactement à la même température dans toute sa hauteur, et dès lors on n'a pas la température précise de la vapeur. M. Regnault a modifié cet appareil en remplaçant le manchon par une caisse de tôle MN (fig. 285) dont le fond porte deux tubulures, dans lesquelles les extrémités supérieures des deux tubes A et B s'engagent, maintenues par des feuilles de caoutchouc. Le tube à vapeur B est relié à un petit ballon *a*, à l'aide d'une tubulure de cuivre à trois branches représentée en O sur la droite du dessin. La troisième branche de cette tubulure est mastiquée à un tube de verre qui aboutit à un tube D rempli de ponce sulfurique et communiquant même avec une machine pneumatique par un dernier tube *l*.

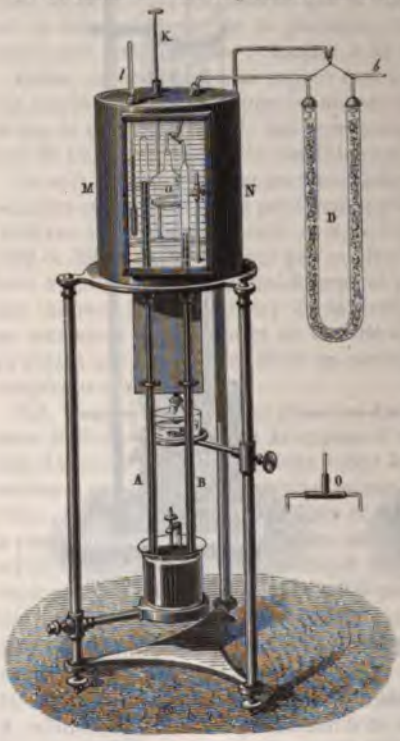


Fig. 285.

Avant que les tubes soient fixés dans la caisse, on intro dans le ballon *a* une petite quantité d'eau, dont on fait disi

n fourneau, ou avec une lampe à alcool placée au-des-
arée des tubes par une planchette de bois. A l'aide d'un
., on mélange constamment les différentes couches du
in d'obtenir une température uniforme pour toutes les
bain dans lequel sont placés les tubes barométriques.
de verre, encastrée dans la paroi de la caisse, permet
, à l'aide d'un cathétomètre, la hauteur du mercure dans
et c'est de la différence de ces hauteurs, ramenées à
déduit la tension de la vapeur. Au moyen de cet ap-
Regnault a mesuré avec précision la force élastique de
l'eau de zéro à 50 degrés.

sion de la vapeur d'eau au-dessus de 100 degrés, par Arago. — Deux procédés ont été mis en usage pour force élastique de la vapeur d'eau à des températures à 100 degrés, l'un par Dulong et Arago, en 1830, M. Regnault, en 1844.

286 donne une coupe verticale de l'appareil dont se ulong et Arago pour mesurer la tension de la vapeur ssus de 100 degrés. Cet appareil consistait en une chau-ivre rouge *k*, de 80 litres de capacité et à parois très-eux canons de fusil *a*, dont un seul est visible dans le ngeaient dans l'eau de la chaudière, aux parois de la-solidement scellés. Fermés à leur partie infé-*t* remplis de mercure dans lequel étaient placés s *t*, qui faisaient connaître la température de l'eau

cuvette. Enfin, un tube de cuivre *i* faisait communiquer la partie supérieure de la cuvette *d* avec un tube vertical *c*, partant directement de la chaudière et donnant issue à la vapeur. Le tube *i* et la partie supérieure de la cuvette *d* étaient remplis d'eau qu'on maintenait constamment à une basse température, en faisant cir-

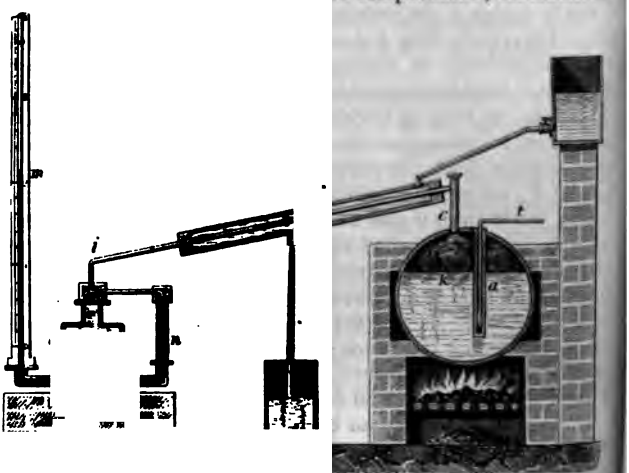


Fig. 286.

culer autour du tube un courant d'eau froide, qui s'écoulait d'un réservoir représenté sur la droite du dessin.

La vapeur qui se dégageait du tube *c* refoulant l'eau du tube *i*, la pression se transmettait à l'eau et au mercure de la cuvette *d*, et le mercure montait dans le manomètre. En prenant, de degré en degré, les températures marquées par les thermomètres, et observant en même temps le manomètre, Dulong et Arago ont mesuré directement, jusqu'à 24 atmosphères, la tension de la vapeur d'eau correspondante à une température donnée. Par le calcul ils l'ont ensuite évaluée jusqu'à 50.

348. **Tension de la vapeur d'eau au-dessus et au-dessous de 100 degrés par M. Regnault.** — On doit à M. Regnault un procédé qui permet de mesurer la tension de la vapeur soit au-dessous, soit au-dessus de 100 degrés. Il consiste à faire bouillir de l'eau dans un vase clos, sous une pression connue, et à mesurer la température à laquelle se produit l'ébullition. En s'appuyant alors ce principe, qu'au moment de l'ébullition la force élastique de vapeur qui se dégage est précisément égale à la pression que

liquide (358), on connaît la tension de la vapeur et la
ture correspondante, ce qui résout la question.
reil se compose d'un vase de cuivre C (fig. 287), herméat fermé et rempli d'eau jusqu'au tiers environ. Quatre

Fig. 287.

nètres traversent le couvercle : deux plongent dans les
es couches du liquide, et les deux autres dans les couérieures. Du vase C part un tube AB qui va s'adapter au
'un ballon de verre M, de 24 litres de capacité et rempli
tube AB est entouré d'un manchon D, dans lequel circule
nt d'eau froide qui s'écoule d'un réservoir E. De la partie
re du ballon M partent deux tubes : l'un communique
manomètre à air libre O; l'autre HH', qui est de plomb,
machine pneumatique, ou avec une pompe foulante, suion veut raréfier l'air du ballon ou le comprimer. Enfin,
oir K est rempli d'eau à la température ambiante.
'abord à mesurer la tension au-dessous de 100 degrés.
l'extrémité H' du tuyau de plomb en communication avec
ne pneumatique, on raréfie l'air dans le ballon M et, par
ns le vase C. Chauffant alors doucement ce vase, l'eau

qu'il renferme entre en ébullition à une température d'autant plus au-dessous de 100 degrés, que l'air a été plus raréfié, c'est-à-dire que la pression est plus faible. D'ailleurs, les vapeurs se condensant dans le tube AB, qui est refroidi d'une manière constante, la pression indiquée primitivement par le manomètre n'augmente pas, et, par suite, la tension de la vapeur, pendant l'ébullition, reste égale à la pression qui s'exerce sur le liquide.

C'est alors que, consultant le manomètre et les thermomètres, on détermine la tension de la vapeur à une température connue. Laissant ensuite rentrer un peu d'air dans les tubes et dans le vase C, afin d'augmenter la pression, on fait une nouvelle observation, et l'on continue ainsi jusqu'à 100 degrés.

Pour mesurer la tension de la vapeur au-dessus de 100 degrés, on fait communiquer l'orifice H' avec une pompe foulante, au moyen de laquelle on soumet l'air du ballon et du vase C à des pressions successives supérieures à celle de l'atmosphère. L'ébullition se trouve alors retardée (358), et il suffit d'observer simultanément le manomètre et les thermomètres pour avoir la tension de la vapeur au-dessus de 100 degrés.

Les tables ci-après donnent la tension de la vapeur d'eau de — 10 degrés à 100, puis de 100 à 230 degrés. La première table a été trouvée au moyen de l'appareil qui vient d'être décrit.

La seconde a été calculée à l'aide de la formule d'interpolation

$$\log F = a + b\alpha^t + c\beta^t,$$

dans laquelle F représente la force élastique de la vapeur, t sa température, a, b, c, α, β, des constantes qu'on calcule en commençant par déterminer cinq forces élastiques, c'est-à-dire cinq valeurs de F correspondantes à des températures connues, ce qui donne lieu à autant d'équations que d'inconnues.

Tensions de la vapeur d'eau de — 10 *degrés à* 100, *d'après M. Regnault.*

TEMPÉRATURES	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.	TEMPÉRATURES	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.	TEMPÉRATURES	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.	TEMPÉRATURES	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.
—10°	2,093	20°	17,391	50°	91,982	80°	354,643
— 5	3,131	25	23,550	55	117,478	85	433,041
0	4,600	30	31,548	60	148,791	90	525,458
+ 5	6,534	35	41,827	65	186,945	95	633,175
10	9,165	40	54,906	70	233,093	100	760,000
15	12,699	45	71,391	75	288,517		

sions, en atmosphères, de 100 degrés à 230,9, d'après M. Regnault.

TURES.	NOMBRE d'atmosphères.	TEMPÉRATURES.	NOMBRE d'atmosphères.	TEMPÉRATURES.	NOMBRE d'atmosphères.	TEMPÉRATURES.	NOMBRE d'atmosphères.
0	1	170,8	8	198,8	15	217,9	22
6	2	175,8	9	201,9	16	220,3	23
9	3	180,3	10	204,9	17	222,5	24
0	4	184,5	11	207,7	18	224,7	25
2	5	188,4	12	210,4	19	226,8	26
2	6	192,1	13	213,6	20	228,9	27
3	7	195,5	14	215,5	21	230,9	28

tables montrent que la tension de la vapeur d'eau croît suiune loi beaucoup plus rapide que la température; mais cette est pas connue.

. **Tension des vapeurs de divers liquides.** — La vapeur d'eau, e de ses nombreuses applications, a d'abord été seule l'objet cherches des physiciens; mais M. Regnault, par les mêmes lés qui lui ont servi à mesurer la force élastique de la vapeur , a aussi déterminé celles des vapeurs d'un certain nombre uides. Le tableau ci-après, qui donne quelques-uns des ré- s obtenus par ce savant, fait voir combien, à température , les vapeurs des divers liquides diffèrent de tension.

TIDES.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.	LIQUIDES.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.
ure . .	0	0,02	Éther . . .	— 20	9
	50	0,11		0	182
	100	0,74		60	1728
				100	4920
il . . .		13	Acide sulfureux . .		
	50	220		— 20	479
	100	1685		0	1165
				60	8124
	— 20	43	Ammoniaque		
re de	0	132		— 30	441
ne .	60	1164		— 20	4273
	100	3329		0	7709

. **Tension des vapeurs des dissolutions salines ou acides.** — e l'eau, ou tout autre liquide, tient en dissolution un sel, de, ou une substance quelconque, l'expérience montre que,

à température égale, la tension de la vapeur est moindre qu du liquide à l'état de pureté, et d'autant moindre, que la lution est plus concentrée.

Si la substance dissoute est elle-même volatile, la tens vapeurs mélangées qui se produisent est moindre que la de leurs tensions respectives, à température égale.

351. **Tension dans deux vases communiquants inégal chauds.** — Lorsque deux vases fermés, contenant un mé quide à des températures inégales, sont mis en communi

la tension commune de vapeur qui s'établit dans ces deu n'est pas, comme on pourrait le croire, la tension moyenn celles qui existent déjà dans chacun d'eux. Par exemple, deux ballons, l'un, A (fig. 288), contenant de l'eau maint zéro dans de la glace fondante; l'autre, B, contenant de l 100 degrés. Tant que les ballons ne communiquent pas, sion, dans le premier, est, en millimètres, 4,6, et dans le s 760, d'après les tables ci-dessus. Mais aussitôt que la com cation est établie par le robinet C, la vapeur du ballon B, e de son excès de tension, se précipite en A; or, comme e condense immédiatement, puisque le ballon est maintenu à il en résulte que la vapeur ne peut acquérir, dans le ball une tension supérieure à celle du ballon A; il y a donc si ment distillation de B vers A sans accroissement de tensi

On peut donc poser ce principe général : *lorsque deux va des températures inégales, et contenant le même liquide en communiquent entre eux, la tension de la vapeur est la dans ces deux vases, et égale à la tension qui correspon plus basse des deux températures.*

!. **Évaporation.** — On a déjà vu (340) qu'on entend par *éva-tion* une production lente de vapeur à la surface d'un li-. C'est par évaporation que les étoffes mouillées sèchent à ou qu'un vase ouvert, rempli d'eau, se vide complétement ut d'un certain temps. C'est à l'évaporation qui se produit à rface des mers, des lacs, des rivières et du sol, que sont les vapeurs qui s'élèvent dans l'atmosphère, s'y condensent ages et se résolvent en pluie.

ut liquide se vaporise tant que sa tension de vapeur n'est ulle; mais sa vaporisation cesse, quelle que soit la tempé-e, dès que l'air ambiant est saturé; ou du moins, s'il y a e vaporisation, elle est équilibrée par une condensation alente. L'acide sulfurique ne donne plus de vapeur au-des-de 30 degrés, même dans le vide. En effet, si l'on place le récipient de la machine pneumatique deux capsules con-nt l'une de l'acide sulfurique, l'autre de l'eau de baryte, et n fasse le vide, tant que la température est inférieure à 30 ts, l'eau ne se trouble pas, ce qui indique qu'il ne se pro-pas de vapeur acide; autrement, celle-ci se dissolvant aus-il y aurait formation de sulfate de baryte, et comme ce sel inement insoluble, le liquide se troublerait.

une expérience déjà ancienne, Faraday avait trouvé qu'en nant une feuille d'or sur l'extrémité inférieure d'un bou-t fermant avec celui-ci un flacon contenant du mercure, t de quelques jours l'or blanchit en s'amalgamant, mais hénomène ne se produit qu'autant que la température est s de — 6 degrés. De là il avait conclu que — 6 degrés empérature limite de la vaporisation du mercure. Davy, té, qui avait trouvé pour limite — 7 degrés, admettait empératures peu supérieures à cette limite, les vapeurs re forment seulement une couche de quelques cen-u-dessus de la surface libre du liquide, ce qui est op-i générale de la diffusion des fluides aériformes (165).

38, M. Regnault avait observé que le mercure se — 15 degrés; et récemment, M. Merget, à Lyon, a e ce liquide donne encore des vapeurs à — 44 de-s, il a reconnu que les vapeurs mercurielles pos-iffusion telle, que, dans des locaux vastes et élevés, le la présence, à la température ordinaire, depuis le plafond, même quand elles sont émises par des sur-oires de peu d'étendue. Le même savant a fait une portante de la diffusion des vapeurs de mercure à ique, à la photographie et à l'hygiène.

353. **Causes qui accélèrent l'évaporation.** — Quatre causes influent sur la rapidité de l'évaporation : 1° la température; 2° la quantité de vapeur du même liquide répandue déjà dans l'atmosphère ambiante; 3° le renouvellement de cette atmosphère; 4° l'étendue de la surface d'évaporation.

L'accroissement de température accélère l'évaporation par l'excès de force élastique qu'il détermine dans les vapeurs.

Pour comprendre l'influence de la seconde cause, remarquons que l'évaporation d'un liquide serait nulle dans un espace saturé de la vapeur du même liquide, et qu'elle atteindrait son maximum dans un air complétement purgé de cette vapeur. Il résulte de là qu'entre ces deux cas extrêmes, la rapidité de l'évaporation varie, selon que l'atmosphère ambiante est déjà plus ou moins chargée des mêmes vapeurs.

Quant au renouvellement de cette atmosphère, son effet s'explique de la même manière; car si l'air ou le gaz qui enveloppe le liquide n'est pas renouvelé, il est promptement saturé, et toute évaporation cesse.

Fig. 289.

L'influence de la quatrième cause est évidente.

354. **Ébullition; ses lois.** — On nomme *ébullition* une production rapide de vapeur, en bulles plus ou moins grosses, dans la masse même d'un liquide.

Lorsqu'on chauffe un liquide, de l'eau par exemple, par la partie inférieure, les premières bulles qui apparaissent ne sont autre chose que de l'air en dissolution dans l'eau, qui se dégage. Puis, de petites bulles de vapeur s'élèvent bientôt de tous les points échauffés des parois; mais, traversant les couches supérieures, dont la température est plus basse, elles s'y condensent avant d'atteindre la surface. C'est la formation et la condensation successives de ces premières bulles de vapeur qui occasionnent le bruissement qui précède ordinairement l'ébullition. Enfin grosses bulles s'élèvent et crèvent à la surface, ce qui constitue le phénomène de l'ébullition (fig. 289).

iquides susceptibles d'entrer en ébullition présentent
s suivantes, qui se constatent par l'expérience :
pérature d'ébullition augmente avec la pression.
me pression donnée, l'ébullition ne commence qu'à
ture déterminée, qui varie d'un liquide à un autre,
toujours la même pour un même liquide, tant qu'il
s les mêmes conditions de pression, de pureté et de
e d'autres corps.
que soit l'intensité de la source de chaleur, du moment
tion commence, la température reste stationnaire.

Températures d'ébullition à la pression 0m,760.

x.	— 10°	Eau distillée.	100°
trique.	+ 11	Essence de térébenthine.	157
e anhydre . . .	25	Phosphore	290
ne pur.	35,5	Acide sulfurique concentré . . .	325
tone.	48	Mercure (au thermomètre à air).	350
. . . . .	63,5	Soufre	440
. . . . .	79	Cadmium (Sainte-Claire Deville	
. . . . .	80	et Troost).	860
monohydraté. .	86	Zinc. . . . . (Id.). . . .	1040

causes peuvent faire varier la température d'ébullition
, savoir : les substances en dissolution, la nature des
nce d'air ou d'autre gaz en dissolution dans le liquide,
on. Nous allons successivement faire connaître les ef-
différentes causes, particulièrement sur l'eau.

nce des substances en dissolution sur la température
. — Une substance dissoute dans un liquide, lors-
t point volatile, ou qu'elle l'est moins que le liquide,
ullition d'autant plus, qu'il y a une plus grande quan-
e substance en dissolution. L'eau, qui bout à 100
qu'elle est pure, ne bout qu'aux températures sui-
qu'elle est saturée de différents sels.

'eau saturée de sel marin bout à.		109°
— —	d'azotate de potasse	116
— —	de carbonate de potasse.	135
— —	de chlorure de calcium.	179

lutions acides présentent des résultats analogues ; mais
ces purement en suspension, comme les matières ter-
ure de bois, n'élèvent pas la température d'ébullition.
e de rappeler ici les expériences de Rudberg, déjà ci-
57, dans lesquelles ce savant a constaté que lorsque la
d'ébullition de l'eau est au-dessus de 100 degrés par
ubstances qu'elle tient en dissolution, la température

de la vapeur qui se dégage est cependant toujours à 100 degrés, comme avec l'eau pure, si la pression est $0^m,760$.

356. **Influence de la nature des vases sur la température d'ébullition.** — Gay-Lussac a observé que, dans un vase de verre, l'eau bout à une température plus élevée que dans un vase de métal, phénomène qu'il a attribué à la cohésion entre le verre et l'eau. En prenant pour 100 degrés la température d'ébullition de l'eau distillée, dans un vase de cuivre, à la pression $0^m,760$, il a trouvé qu'à pression égale, ce liquide, dans un ballon de verre, n'entre en ébullition qu'à 101 degrés; et quand le vase de verre a été bien nettoyé avec de l'acide sulfurique concentré ou de la potasse, la température de l'eau peut s'élever jusqu'à 105 et même 106 degrés. Toutefois un simple fragment de métal placé au fond du ballon suffit pour ramener la température d'ébullition à 100 degrés, et en même temps pour faire disparaître les soubresauts violents qui accompagnent l'ébullition des dissolutions salines ou acides dans les vases de verre.

De même que pour les substances en dissolution, la température de la vapeur n'est pas influencée par celle que prend l'eau dans les vases de verre. A la pression $0^m,760$, elle est encore de 100 degrés, ainsi que dans les vases de cuivre.

357. **Influence de la privation de l'air sur la température d'ébullition.** — On a vu, lorsque l'eau est purgée d'air, que son point de congélation peut être retardé de plusieurs degrés (338). La privation d'air dans l'eau change aussi sa température d'ébullition. Deluc remarqua, le premier, que de l'eau privée d'air par l'ébullition et renfermée dans un matras à long col pouvait être portée à 112 degrés sans entrer en ébullition. M. Dony, à Gand, en 1845,

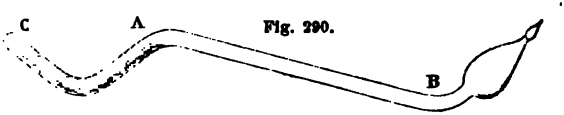


Fig. 290.

a étudié le même phénomène au moyen d'un tube de verre AB (fig. 290) recourbé à une extrémité, et terminé à l'autre par une grosse boule de même matière et par une plus petite qui se prolonge en pointe effilée. Avant de fermer celle-ci, on introduit de l'eau dans le tube, par le même procédé que pour le thermomètre à alcool (286), puis on fait bouillir un certain temps pour chasser tout l'air. Soudant alors la pointe effilée à la lampe, il reste l'eau dans la branche recourbée, et seulement de la vapeur à très-faible tension dans le tube AB et dans les boules. Or si l'on plonge maintenant la partie AC remplie d'eau dans un bain de

r, à Lausanne, a étudié le retard d'ébullition des li-
s maintenant, hors du contact de l'air, en suspension
quides de même densité, mais à température d'ébulli-
evée. Il a ainsi trouvé que l'eau, en suspension dans
convenable d'essence de girofle et d'huile de lin qu'on
bain-marie, ne se transforme en vapeur brusque-
rès de 120 degrés. L'acide sulfureux liquide, qui bout à
s, maintenu en suspension dans un mélange d'eau et
urique, reste liquide jusqu'à + 18 degrés.
savant a en outre observé que si l'on touche, avec un
quelconque, les liquides ainsi portés, au sein d'un
e, à une température supérieure à celle de leur ébul-
iquides se vaporisent instantanément d'une manière
utefois les corps ainsi employés comme excitateurs
à peu leur propriété active. M. Dufour explique ce
par l'influence de la couche d'air adhérente à ces
lorsque, par une immersion prolongée, l'air condensé
ce s'est dégagé, ils sont complétement inactifs.
entes expériences font voir l'influence de la présence
la température d'ébullition. Du reste, M. Dufour a
plus la quantité de gaz dissoute dans un liquide est
le point d'ébullition est abaissé.
ence de la pression sur la température d'ébullition.
es tables des forces élastiques données plus haut, à
température à laquelle l'eau distillée entre en ébulli-

la pression, on place sous le récipient de la machine pneumatique une capsule contenant de l'eau à 30 degrés environ, puis on fait le vide. On voit alors le liquide entrer en ébullition avec une grande rapidité, bien qu'en vase clos; ce qui résulte de ce que la vapeur est aspirée par la machine à mesure qu'elle se produit.

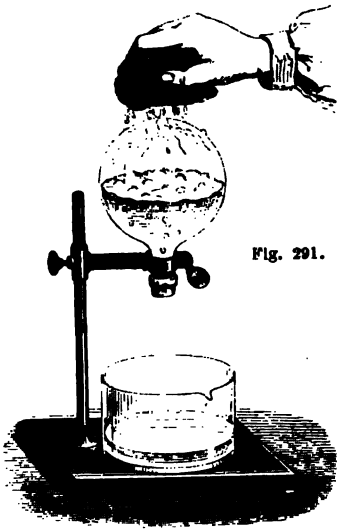


Fig. 291.

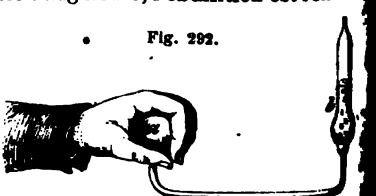
On peut faire la même expérience sans avoir recours à la machine pneumatique. Pour cela, on prend un ballon de verre dans lequel on fait bouillir de l'eau pendant quelques instants. Quand les vapeurs qui se dégagent ont entraîné tout l'air du ballon, on bouche celui-ci hermétiquement, et on le retourne (fig. 291). Si l'on en refroidit alors la partie supérieure avec une éponge imbibée d'eau froide, les vapeurs se condensent, le vide se fait, et une vive ébullition se produit.

Dans le vide absolu, l'eau entrerait en ébullition à zéro, puisque la tension de sa vapeur est encore de $4^{mm},6$ (345).

C'est par la diminution de pression que, sur les hautes montagnes, l'eau bout au-dessous de 100 degrés. Sur le mont Blanc, le liquide entre en ébullition à 84 degrés.

Si, au contraire, la pression augmente, l'ébullition est retardée; à 2 atmosphères, l'eau ne bout qu'à $120^{o},6$.

Fig. 292.



359. **Bouillant de Franklin.** — On démontre encore l'influence de la pression sur la température d'ébullition au moyen du *bouillant de Franklin*. C'est un petit appareil de verre formé d'une boule *a* et d'un tube *b* réunis par un tube d'un petit diamètre (fig. 292). Le tube *b* étant effilé à son extrémité supérieure, avant qu'il soit fermé, on y introduit de l'eau; puis, faisant passer le liquide

la boule *a*, on le fait bouillir en chauffant celle-ci avec une à alcool. Lorsqu'on juge que les vapeurs ont entraîné, en rageant, tout l'air qui était dans l'appareil, on ferme l'extré- du tube *b* en la fondant à la lampe. L'appareil ne contenant l'air, l'eau ne supporte d'autre pression que la tension de peur, tension qui, à la température ordinaire, est très-faible. ulte de là que, prenant la boule *a* dans la main, la chaleur lle-ci donne à la vapeur une tension qui refoule l'eau dans e *b*, et y détermine une vive ébullition.

. Mesure de la hauteur des montagnes par la température llition. — La dépendance qui existe entre la température llition et la pression donne le moyen, au lieu de mesurer la r des montagnes par le baromètre, de la mesurer par le nomètre. En effet, si l'on observe, par exemple, que sur le met d'une montagne l'eau bout à 95 degrés, tandis qu'à sa elle bout à 98 degrés, et qu'on cherche dans les tables des s élastiques les tensions correspondantes, on trouve des res qui représentent, en millimètres de mercure, la force que de la vapeur au moment où elle se dégage, au sommet pied de la montagne, et par suite la pression atmosphérique rtée par l'eau en ébullition aux deux stations. Connaissant la hauteur du baromètre au sommet de la montagne et à sa , on applique sans difficulté les formules déjà données pour rer la hauteur des montagnes à l'aide du baromètre (155).

ns cette méthode, on ne fait usage que de thermomètres très- bles, gradués seulement de 80 à 100 degrés environ, de ma- que, chaque degré occupant une grande étendue sur l'é- , on puisse apprécier les dixièmes et même les vingtièmes gré. C'est sur ce principe qu'est construit le *thermomètre nométrique* de M. Regnault, dont la tige est graduée seule- de 85 à 100 degrés, chaque degré étant lui-même divisé en rties égales. Pour l'usage de ce thermomètre, M. Regnault a ruit des tables qui donnent la tension de la vapeur d'eau pour ne dixième de degré de 85 à 101.

. Production de la vapeur en vase clos. — Jusqu'ici on a sé que les vapeurs se produisaient dans un espace indéfini les pouvaient se répandre librement. Ce n'est qu'à cette con- n qu'il peut y avoir ébullition ; en vase clos, les vapeurs qui oduisent ne trouvant aucune issue, leur tension et leur den- roissent de plus en plus avec la température ; mais le déga- nt rapide qui constitue l'ébullition est impossible. Par con- nt, tandis que, dans un vase ouvert, la température d'un le ne peut dépasser celle de son ébullition, dans un vase clos,

au contraire, elle peut s'élever beaucoup au delà. L'état liquide a néanmoins alors une limite; car, d'après des expériences dues à Cagniard-Latour, si l'on introduit de l'eau, de l'alcool ou de l'éther dans de forts tubes de verre, et qu'on les ferme à la lampe après en avoir expulsé l'air par l'ébullition, on observe qu'en soumettant ces tubes à une source de chaleur suffisante, il vient un moment où tout à coup le liquide disparaît en se transformant en vapeurs, dont le volume diffère peu de celui du liquide. Cagniard-Latour a trouvé ainsi que l'éther sulfurique se réduit totalement en vapeur à 200 degrés, dans un espace moindre que le double de son volume à l'état liquide, et que la tension est alors de 38 atmosphères.

362. **Marmite de Papin.** — Papin, médecin français, mort en 1710, est le premier physicien qui ait étudié les effets de la production de la vapeur en vase clos. L'appareil qui porte son nom est un vase cylindrique de bronze D (fig. 293), muni d'un couvercle qu'on fixe très-solidement au moyen d'une vis de pression B, qui le maintient comprimé contre la marmite. Afin de fermer hermétiquement l'appareil, on a soin, avant de serrer le couvercle, d'interposer des feuilles de plomb entre ses bords et ceux de la marmite. A la base d'une cavité cylindrique qui traverse le cylindre S et la tubulure *o*, le couvercle est percé d'un petit trou fermé par une soupape conique sur laquelle s'appuie un boulon *n*. Ce boulon, qui traverse le cylindre et la tubulure, se trouve pressé contre le disque obturateur par un levier A, mobile à son extrémité *a*. Enfin, un poids *p*, qui se déplace le long du levier A*a*, permet d'exercer sur le boulon *n* une pression d'autant plus grande, que ce poids est plus loin de l'extrémité *a*, d'après une propriété connue des leviers (49). La charge de la soupape pouvant ainsi varier, on la règle de manière que, lorsque la vapeur, dans l'intérieur de la marmite, a atteint une tension déterminée, 6 atmosphères par exemple, la soupape soit soulevée et donne issue à la vapeur. On peut ainsi éviter la rupture de l'ap-

Fig. 293.

ante des liquides, en donnant le moyen de les porter à une
ature supérieure à celle de leur point d'ébullition; c'est
oi on lui donne aussi le nom de *digesteur*.

Chaleur latente des vapeurs. — D'après la troisième loi de
ition (354), la température des liquides demeurant station-
endant toute la durée du phénomène, il faut en conclure
ns la vaporisation, ainsi que dans la fusion, il y a dispa-
d'une quantité considérable de chaleur sensible, dont
e effet est de faire passer les corps de l'état liquide à l'état
me; car cette quantité de chaleur n'agit pas sur le thermo-
puisque la vapeur qui se dégage est toujours à la même
ature que son liquide, ou à une température peu infé-
Cette chaleur disparue, qu'on désigne sous les noms de
r latente, chaleur d'élasticité, chaleur de vaporisation,
nsformée, d'une part en travail intérieur pour augmenter
sse des vibrations des atomes, de l'autre en travail exté-
qui communique aux vapeurs leur force expansive au
t du passage de l'état liquide à l'état gazeux (270).

le que soit la température à laquelle une vapeur se pro-
l y a toujours disparition de chaleur. Qu'on verse sur la
n liquide volatil, de l'éther par exemple, on ressent un
ès-vif, qui provient de la chaleur disparue pendant la vapo-
[1], laquelle peut ainsi devenir une source de froid très-

t avait posé cette loi, que, *pour chauffer à partir de zéro et vaporiser un*

intense, capable de solidifier le mercure (364) et même les gaz, ainsi qu'il sera démontré ci-après par l'expérience (370).

On verra bientôt (402) comment on détermine la quantité de chaleur absorbée par les liquides pendant la vaporisation.

364. **Froid dû à l'évaporation, cryophore, congélation du mercure.** — On vient de voir, lorsqu'un liquide se vaporise, qu'une quantité considérable de chaleur disparaît. Par suite, si un liquide qui s'évapore ne reçoit pas une quantité de chaleur équivalente à celle qui devient latente, sa température s'abaisse, et le refroidissement est d'autant plus grand que l'évaporation est plus rapide.

Leslie est parvenu à congeler l'eau par le seul effet d'une vaporisation rapide. Pour cela, on place sous le récipient de la machine pneumatique un vase de verre contenant de l'acide sulfurique concentré, et au-dessus une petite capsule A de liége ou de

Fig. 294.

Fig. 295.

gutta-percha (fig. 294), contenant quelques grammes d'eau. En faisant le vide, l'eau entre en ébullition (358), et les vapeurs étant absorbées par l'acide sulfurique à mesure qu'elles se dégagent, il se produit une vaporisation rapide qui amène bientôt la congélation de l'eau qui est dans la capsule.

On arrive au même résultat avec le *cryophore*, dû à Wollaston. C'est un tube de verre recourbé, terminé à ses extrémités par deux boules (fig. 295). Après y avoir introduit un peu d'eau et en avoir expulsé l'air par le même procédé que pour le tube de Donny (357), on fait passer l'eau dans la boule A, et on plonge l'autre dans un mélange réfrigérant. Les vapeurs dans le tube et dans la boule inférieure étant condensées par le froid, l'eau de la boule A entre en ébullition et en fournit de nouvelles. Cette production re-

vapeur se produit, et par suite la pression. D'après les travaux de M. Regnault, ces deux lois ne sont exactes ni l'une ni l'autre, la quantité totale de chaleur croissant avec la température, tandis que la chaleur latente décroît.

e à alcool, a vu celui-ci descendre jusqu'à 100 degrés de zéro, sans que l'alcool se congelât; mais avec un protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide Despretz a obtenu un froid assez intense pour amener état sirupeux épais (334).

produit par l'évaporation est utilisé, dans les pays ir rafraîchir l'eau au moyen d'*alcarazas*. On nomme ses de terre assez poreux pour que l'eau filtre lente- ers et vienne s'évaporer à la surface, surtout si on les un courant d'air.

QUÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ

éfaction des vapeurs. — La *liquéfaction* ou *condensa- peurs* est leur passage de l'état aériforme à l'état li- s causes peuvent opérer la condensation : le refroidis- compression et l'affinité chimique. Les deux pre- es exigent que les vapeurs soient à l'état de saturation la dernière produit la liquéfaction des vapeurs même éfiées. C'est ainsi qu'un grand nombre de sels absor- condensant, la vapeur d'eau de l'atmosphère, en quel- roportion qu'elle s'y trouve.

condensent, la force vive communiquée vaporisation (363) est transformée pour équivalente, en chaleur sensible. On vé-

la vaporisation, il y a perte de chaleur et production de force vive; dans la liquéfaction, perte de force vive et production de chaleur.

366. **Distillation, alambics.** — La *distillation* a pour objet de séparer un liquide volatil des substances fixes qu'il tient en dissolution, ou deux liquides inégalement volatils.

Les appareils employés pour la distillation se nomment *alambics*. Ils se composent de trois pièces principales : 1° la *cucurbite* A (fig. 296), vase de cuivre rouge étamé, qui contient le liquide à distiller, et dont la partie inférieure est maçonnée dans un fourneau ; 2° le *chapiteau* B, qui se pose sur la cucurbite et donne issue à la vapeur par un col latéral C ; 3° le *serpentin* S, consistant en un long tuyau d'étain ou de cuivre étamé, enroulé en hélice, et placé dans une cuve remplie d'eau froide : l'objet du serpentin est de condenser la vapeur en la refroidissant.

S'agit-il de distiller, par exemple, de l'eau de puits ou de rivière pour la débarrasser des sels qu'elle tient en dissolution, et qui sont surtout du sulfate de chaux, du carbonate de chaux et des chlorures, on en remplit la cucurbite aux deux tiers environ,

Fig. 296 (h = 1m,45).

et l'on chauffe ; l'eau entre en ébullition, et les vapeurs qui se dégagent vont se condenser dans le serpentin, d'où l'eau distillée provenant de la condensation se rend dans un récipient D, tandis que les matières fixes restent dans la cucurbite.

Les vapeurs qui se condensent échauffant rapidement l'eau de la cuve (365), il importe de renouveler cette eau constamment;

ondensation n'aurait plus lieu. A cet effet, un entonnoir, l'une manière continue par un courant d'eau froide, con-
-ci à la partie inférieure de la cuve, tandis que l'eau ui est moins dense, se porte à la partie supérieure, et par un tube adapté au haut de la cuve.

llation ne doit pas être poussée trop loin, dans la e l'eau renfermant des matières organiques, celles-ci décomposées sur les parois chaudes de la cucurbite et t naissance à des produits volatils.

stillée est parfaitement limpide et ne laisse aucun résidu évaporation ; mais elle renferme toujours un peu d'acide e, car ce gaz, existant dans toutes les eaux naturelles, pare qu'incomplétement par la distillation. On peut évi- ence de ce gaz en mettant dans la cucurbite une cer- tité de chaux qui se combine avec lui et le retient.

r la distillation, à l'aide d'alambics analogues à celui essus, qu'on extrait des vins l'alcool qu'ils contiennent.

ambic de Salleron pour l'essai des vins. — M. Salleron a

97.

pour déterminer la richesse alcoolique des vins et au- ueux, un appareil distillatoire, qui est une modifica- appareil de même genre dû à Gay-Lussac. Il se compose n de verre supporté par trois pieds, et chauffé à l'aide pe à alcool (fig. 297). Un tube met ce ballon en commu- avec un serpentin placé dans un vase de cuivre plein de, au-dessous duquel est une éprouvette qui reçoit le

produit de la distillation. Sur l'éprouvette sont tracées troi sions : l'une, *a*, est destinée à marquer le volume de vin doit distiller; les deux autres, marquées $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{2}$, servent luer le volume du liquide résultant de la distillation.

On commence par remplir l'éprouvette jusqu'en *a* du essayer; puis, ayant versé le contenu dans le ballon, on me ci en communication avec le serpentin. Chauffant alors lampe, le vin entre en ébullition, et la distillation s'opère prolonge, pour les vins ordinaires, jusqu'à ce que le liqui tillé s'élève dans l'éprouvette à la division $\frac{1}{3}$, et à la division les vins très-alcooliques; car on peut admettre que tout l'al vin est alors passé dans l'éprouvette. Enfin, on achève de l'éprouvette d'eau distillée jusqu'en *a*, ce qui donne un liq même volume que celui du vin sur lequel on a expérim également riche en alcool, mais débarrassé de toute sul étrangère. Il ne reste donc qu'à mesurer le degré de ce avec l'alcoomètre de Gay-Lussac (111). A cet effet, l'app M. Salleron est accompagné d'un alcoomètre de ce genr thermomètre et d'une table de correction.

On construit aussi des *thermomètres alcoométriques* d à faire connaître la richesse des vins en alcool d'après la rature d'ébullition. Au sommet de la tige du thermomètr nombre 100, qui marque la température d'ébullition de l' les degrés inscrits au-dessous marquent les centièmes pur contenu dans le liquide soumis à l'expérience.

368. **Absorption, tubes de sûreté.** — On nomme *absorpt* chimie, un accident qui se produit dans les appareils qui à la préparation des gaz, et qui consiste, lorsque ceux-ci cueillis sur l'eau ou sur le mercure, en ce que ces liquides trent dans les appareils et font manquer l'opération.

Cet accident a pour cause l'excès de la pression atmosph sur la tension du gaz dans l'appareil. Soit, en effet, un gaz gageant d'un matras *m* (fig. 298), et se rendant dans une vette A remplie d'eau. Tant que le gaz se dégage activem tension l'emporte sur la pression atmosphérique et sur le p la colonne d'eau *on;* l'eau de l'éprouvette ne peut donc dans le tube, et l'absorption est impossible. Mais si la décroît, parce que le dégagement se ralentit, ou parce matras s'est refroidi, la pression extérieure l'emporte, et l'excès de cette pression sur la pression intérieure surp poids de la colonne d'eau *co*, l'eau pénètre dans le matras, pération est manquée. On prévient cet accident au moy *tubes de sûreté.*

ainsi des tubes destinés à prévenir l'absorption, en er l'air dans les appareils, à mesure que la tension croît. Le tube de sûreté le plus simple consiste en un 299), traversant le bouchon qui ferme le matras M e gaz se produit, et plon- lques centimètres dans le au dans ce matras. Quand az diminue dans le vase M, mosphérique qui s'exerce a cuve E, la fait monter à hauteur dans le tube DA; ression s'exerçant aussi Co, tend à déprimer d'au- qui est dans ce tube, en ce liquide ait sensible-

Fig. 298.

densité que l'eau de la cuve E. Or, comme la distance que la hauteur DH, l'air rentre par l'orifice *o*, avant a cuve s'élève jusqu'en A, et il n'y a pas absorption.

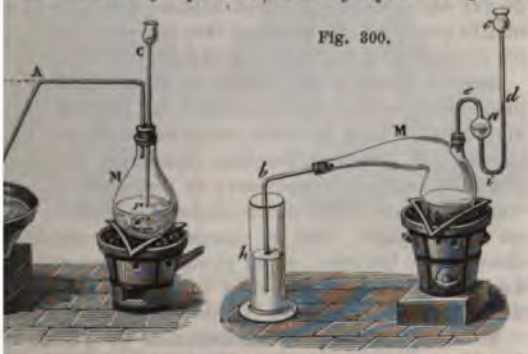


Fig. 300.

sert aussi à prévenir les explosions : lorsque la pro- z est trop rapide, et que le tube AD ne peut suffire it, le liquide est refoulé à l'extérieur et s'échappe qui devient lui-même une issue pour le gaz aussitôt s'est abaissé au-dessous de l'orifice *o*.

00 représente une autre espèce de tube de sûreté, nom de *tube en* S. Ce tube possède une boule *a*, con- rtaine quantité de liquide, ainsi que la branche *id*. sion du gaz, dans la cornue M, surpasse la pression , le niveau dans la branche *id* s'élève plus haut que *a*; si le gaz a une tension d'une atmosphère, le ni-

veau est le même dans le tube et dans la boule. Enfin, sion du gaz est moindre que la pression atmosphériq veau baisse dans la branche *di;* et comme on a soin que *ai* soit moindre que *bh*, aussitôt que l'air entré par est arrivé dans la partie courbe *i*, il soulève la colonne nètre dans la cornue avant que l'eau de l'éprouvette se jusqu'en *b;* dès lors la tension intérieure devient égale sion extérieure, et l'absorption ne peut avoir lieu.

369. **Liquéfaction des gaz.** — Les gaz, n'étant autre des vapeurs très-dilatées, sont, comme elles, suscepti liquéfiés. Mais étant très-loin de leur point de liquéfact peut les y ramener que pa sion ou un refroidissemer moins considérable. Pour uns, la compression seule froidissement suffit; pour l ces deux procédés de liquéf vent être employés simultan

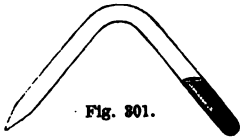


Fig. 301.

de gaz ont résisté à ces deux actions combinées, et l' mettre que ceux qui n'ont pu être liquéfiés (129) le se les soumettait à une pression et à un refroidissement

Davy et Faraday ont liquéfié un grand nombre de g jusqu'alors comme permanents. Leur procédé consist mer dans un tube de verre recourbé en siphon (fig. 30 stances qui, par leur réaction chimique, donnent n gaz qu'il s'agit de comprimer; de sorte que ces subst contenues dans l'une des branches du syphon, le gaz qu'il se dégage, vient se comprimer lui-même et dans l'autre branche, qu'on plonge dans un mélange Les deux physiciens ont ainsi liquéfié le chlore, l'aci drique, l'ammoniaque et l'acide carbonique.

370. **Liquéfaction et solidification de l'acide carb** L'acide carbonique ne pouvant être amené à l'état liqui une pression considérable, sa liquéfaction ne doit s' dans des appareils spéciaux, présentant la plus gran Le premier appareil de ce genre a été construit par Th figure 302 représente l'appareil de Thilorier modifié par

Cet appareil se compose de deux réservoirs cylindri entièrement semblables, mobiles, dans un plan vertical deux pivots soutenus par des châssis de fonte V,V. Ces qui sont de fonte et d'une capacité de 6 litres, ont un de 3 centimètres; dans le sens de leur longueur, ils po nervures ayant un centimètre de saillie sur le reste de

une largeur de 8 centimètres. Pour donner à l'appareil toute la résistance nécessaire, des bandes de fer doux *m*, partant du haut des réservoirs, s'emboîtent dans le creux formé par deux nervures consécutives, s'enroulent sur le fond inférieur qui est hémisphérique, puis reviennent sur l'autre face se terminer à l'ex-

trémité d'où elles sont parties. Enfin, ces bandes sont fortement maintenues par quatre cercles *n*, *o*, *p*, *q*, aussi de fer doux. Avant de mettre ces cercles en place, on les porte à la température rouge, en sorte qu'en se refroidissant, ils exercent par leur contraction une pression considérable sur les bandes et sur les cylindres.

Sur la tête de chaque réservoir est un robinet M, formé de plusieurs pièces. Une clef *a* sert à le serrer fortement dans un écrou taraudé dans la masse de fonte. Dans le robinet est un conduit vertical qui se bifurque en *x* vers *b* et vers *d*, et met ainsi l'intérieur du cylindre en communication avec deux orifices pratiqués en *b* et en *d*, dont on n'ouvre jamais qu'un seul à la fois. Une vis *z*, qui se serre à l'aide d'une clef *c*, est destinée à fermer le conduit intérieur avant sa bifurcation en *x*. Pour cela, elle comprime une balle de plomb qui ferme hermétiquement l'orifice du conduit. C'est de la même manière que sont fermés les orifices *d* et *b*.

Les deux réservoirs étant identiques, on prend l'un pour générateur de l'acide carbonique; l'autre sert de récipient pour sa liquéfaction. Soit P le générateur; le robinet M étant enlevé, on introduit dans le cylindre 1 800 grammes de bicarbonate de soude, 3 litres d'eau chauffée à 39°, et 1 kilogramme d'acide sulfurique. Afin que ce dernier ne décompose pas tout de suite le bicarbonate de soude, on le verse dans un long tube de cuivre rouge R (fig. 303), et on place ce tube, qui reste ouvert à l'extrémité supérieure, dans le cylindre P. Cela fait, on remet le robinet M, qu'on serre fortement; puis, l'ayant fermé, on incline doucement le cylindre, en le faisant tourner sur ses deux pivots, de manière qu'une petite quantité d'acide sulfurique se déverse du vase R et tombe sur le bicarbonate. On incline ainsi successivement l'appareil, mais à plusieurs reprises, jusqu'à ce que tout l'acide soit déversé.

En 7 minutes la réaction chimique est terminée. L'acide carbonique qui s'est produit dans le générateur est alors en partie liquéfié et mélangé à l'eau qui a servi à sa préparation. Mais si l'on fait communiquer le récipient Q au générateur par un tube de cuivre *r*, à petit diamètre, et si l'on desserre la vis *d*, l'acide carbonique distille dans le récipient, où il se liquéfie de nouveau par sa propre pression. La pression qui a lieu alors dans le récipient est de 50 atmosphères, la température étant de 15 degrés. En recommençant cinq ou six fois la même opération, on condense dans le récipient jusqu'à deux litres d'acide carbonique liquide.

Pour l'obtenir solide, le robinet du récipient Q porte, à sa partie inférieure, une tubulure qui plonge dans l'acide liquide. Par suite, lorsqu'on ouvre un orifice *g* placé sur le côté du robinet, par l'effet de la pression qu'il supporte, l'acide carbonique liquide jaillit avec force, en repassant aussitôt à l'état aériforme. Mais une partie du liquide seulement se gazéifie; car la chaleur disparue pendant ce changement d'état est si considérable (402), que l'autre partie du liquide se solidifie en flocons blancs, cristallisés sous forme fumeuse. On recueille ces flocons dans une boîte sphérique de laiton mince, dont chaque hémisphère est muni d'une tubulure garnie de feutre épais, laquelle sert de poignée (fig. 304). L'acide carbonique liquide arrive par un tube qui pénètre à l'intérieur tangentiellement à la paroi. A la sortie de ce tube, le jet vient frapper sur une petite lame *a*, qui le divise et accélère la vapori-

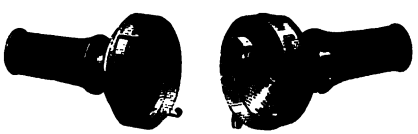


Fig. 304.

d'un flocon d'acide carbonique solide placé sur les chairs
se les tissus, comme le ferait une vive brûlure. Un pareil
olidifie en quelques secondes quatre fois son poids de
En y plongeant un tube plein d'acide carbonique liquide,
pu solidifier ce dernier en une masse compacte présen-
nsparence d'un morceau de glace.
refroidissement de — 90°, obtenu au moyen de la vapo-
n gaz ammoniac liquéfié, Drion et Lenoir ont liquéfié
bonique à la pression d'une atmosphère.
réfaction du protoxyde d'azote. — Dans l'appareil de
c'est le gaz qui se comprime lui-même en se produisant
suffisante. Or tous les gaz ne s'obtiennent pas dans
ns convenables pour pouvoir se liquéfier ainsi par leur
ion. Il faut alors avoir recours à une pression artifi-
ainsi que Natterer a liquéfié plusieurs gaz en les com-
ns un canon de fusil à l'aide d'une pompe foulante.
hi a modifié l'appareil de Natterer et lui a donné la
ésentée en perspective dans la figure 305, et en coupe,
ns grande échelle, dans la figure 306. Cet appareil se
'un réservoir A, de fer forgé, d'une capacité de 7 à 8
et pouvant résister à des pressions de 600 atmosphères.
inférieure est vissée une pompe foulante. La tige *t* de
son mouvement de va-et-vient d'une bielle E, et
M. La compression du gaz et le frottement du pis-
à un grand dégagement de chaleur, on entoure

Lorsqu'on a fait marcher l'appareil un certain temps, o
le réservoir de dessus la pompe, et cela sans que le gaz
puisse s'échapper, le réservoir A se trouvant herméti

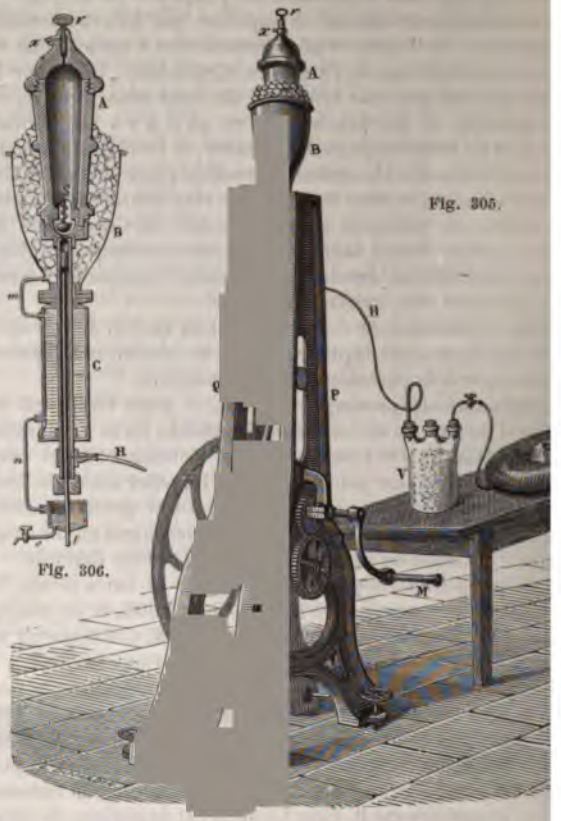


Fig. 305.

Fig. 306.

fermé par une soupape S (fig. 306). Pour recueillir le li
tenu dans le réservoir, on retourne celui-ci et l'on d
bouchon à vis *r*, qui donne issue au liquide par une t

La liquéfaction la plus remarquable obtenue à l'aide
pareil est celle du protoxyde d'azote. Une fois liquéfi
quoique en vase ouvert, ne se vaporise que lentement e
tient à une température fixe de 88 degrés au-dessous d

ercure qu'on y projette en petite quantité se congèle aussitôt. Il est de même de l'eau; mais il faut la verser goutte à goutte, on la chaleur latente de ce liquide étant beaucoup plus grande e celle du mercure (401), la chaleur cédée par l'eau, au moment sa congélation, peut faire détoner le protoxyde d'azote.

Le protoxyde d'azote, étant facilement décomposé par la chaur, a, comme on sait en chimie, la propriété d'entretenir la comstion presque aussi vivement que l'oxygène. Or il conserve ene cette propriété à l'état liquide, malgré sa basse température. effet, si l'on y projette un petit morceau de charbon incandesnt, celui-ci brûle aussitôt avec un vif éclat.

MÉLANGES DES GAZ ET DES VAPEURS

372. Lois des mélanges des gaz et des vapeurs. — Tout mélange n gaz et d'une vapeur présente les deux lois suivantes :

1° *La tension et, par suite, la quantité de la vapeur qui sae un espace donné sont les mêmes, à température égale, soit cet espace soit vide, soit qu'il contienne un gaz.*

2° *La force élastique du mélange égale la somme des forces mes du gaz et de la vapeur mélangés, le gaz étant rapon volume primitif.*

, connues sous le nom de *lois de Dalton,* qui les a fait , se démontrent au moyen d'un appareil dû à Gay-Lus- consistant en un tube de verre A (fig. 307), mastiqué par eux extrémités à deux robinets de fer *b* et *d*. Au-dessus du et *d* est une tubulure latérale qui met en communication le A avec un second tube B d'un plus petit diamètre. Une e placée entre ces deux tubes mesure la hauteur des co- de mercure contenues dans chacun.

tube A étant rempli de mercure sec, et les robinets *b* et *d* s, on visse sur le robinet *b*, à la place de l'entonnoir C, un de verre M fermé lui-même par un robinet, et rempli d'air ché, ou de tout autre gaz. Puis, ouvrant les trois robinets, aisse écouler du tube A une partie du mercure, qui est remée par l'air sec du ballon. On ferme alors les robinets, et e l'air qui est dans l'espace A s'est dilaté en sortant du bal- il est à une pression moindre que la pression atmosphéri- on l'y ramène en versant du mercure dans le tube B, jusqu'à e le niveau soit le même dans les deux tubes. Enfin, on en- le ballon et son robinet, et l'on met à la place un entonnoir uni lui-même d'un robinet *a*, qui diffère des robinets ordi- s. En effet, il n'est pas percé de part en part, mais porte seu-

lement une petite cavité, ainsi qu'on le voit en *n*. Ayant versé dans l'entonnoir C le liquide qu'on veut vaporiser, noté le niveau *k* du mercure et ouvert le robinet *b*, on tourne le robinet *a* de manière que sa cavité se remplisse; puis on le retourne, afin que le liquide pénètre dans l'espace *l* et s'y vaporise. On continue à faire tomber ainsi le liquide goutte à goutte, jusqu'à ce que l'air qui est dans le tube soit saturé de vapeur: ce qu'on reconnaît quand le niveau *k* du mercure cesse de s'abaisser (343).

Fig. 307.

Comme la tension de la vapeur qui s'est produite dans l'espace *l* s'est ajoutée à celle de l'air qui y était déjà, le volume du gaz a augmenté; on le ramène au volume primitif en versant de nouveau du mercure dans le tube B. Lorsque le mercure est ainsi remonté dans le gros tube au niveau *k* qu'il avait d'abord, on observe dans les tubes B et A une différence de niveau B*o*, qui représente la tension de la vapeur qui s'est produite; car l'air ayant repris son premier volume, sa tension n'a pas changé. Or, si l'on fait passer dans le vide d'un tube barométrique quelques gouttes du même liquide introduit en A, on observe une dépression précisément égale à B*o*; donc, *à température égale, la tension de la vapeur saturée et, par suite, sa densité sont les mêmes dans le vide et dans les gaz.*

La seconde loi se trouve démontrée par l'expérience ci-dessus; car, lorsque le mercure a repris son niveau *k*, le mélange supporte la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube B, plus le poids de la colonne de mercure B*o*. Or ces deux pressions représentent, l'une la tension de l'air sec, et l'autre la tension de la vapeur. Du reste, la seconde loi découle de la première.

L'appareil de Gay-Lussac ne permet d'expérimenter qu'à la température ordinaire; mais M. Regnault, au moyen d'un appareil qui peut être porté à différentes températures, a comparé successive-

, dans l'air et dans le vide, les tensions des vapeurs d'eau, er, de sulfure de carbone et de benzine, et il a constamment vé que la tension dans l'air est plus faible que dans le vide. fois les différences sont tellement petites, qu'elles n'infir- pas la loi de Dalton et de Gay-Lussac; aussi M. Regnault -t-il qu'on doit continuer à admettre cette loi comme rigou- théoriquement, attribuant les petites différences qu'il a con- s à l'affinité hygroscopique des tubes.

Problèmes sur les mélanges des gaz et des vapeurs. — I. Étant donné lume d'air sec V, à la pression H, on demande quel sera son volume V′ il sera saturé, la température et la pression restant les mêmes.

on représente par F la force élastique de la vapeur qui sature l'air, celui-ci, mélange, est seulement soumis à la pression H — F (372, 2°). Or, d'après le Mariotte, les volumes V et V′ étant en raison inverse des pressions qu'ils rient, on a $\frac{V'}{V}=\frac{H}{H-F}$, d'où $V'=\frac{VH}{H-F}$.

Étant donné un volume d'air saturé V, à la pression H et à la température t, on son volume V′, aussi saturé, à la pression H′ et à la température t'? on représente par f la tension maximum de la vapeur à t degrés, et par f' ion maximum à t' degrés, l'air seul, dans chacun des mélanges V et V′, mis respectivement aux pressions $H-f$ et $H'-f'$. En supposant d'a- s température constante, on aura donc, d'après la loi de Mariotte,

$=\frac{V(H-f)}{H'-f'}$ à t degrés, d'où $V'=\frac{V(H-f)}{(H'-f')(1+\alpha t)}$ à zéro (320);

donc, à t' degrés, $V'=\frac{V(H-f)(1+\alpha t')}{(H'-f')(1+\alpha t)}$.

On demande le poids P d'un volume d'air V, saturé de vapeur d'eau, à la ature t et à la pression H, la densité de la vapeur étant $\frac{5}{8}$.

r résoudre cette question, observons que le volume V d'air saturé est en m mélange de V litres d'air sec à t degrés, à la pression H moins celle apeur, et de V litres de vapeur saturée à t.

l l'on représente par F la tension de la vapeur, la pression de l'air consi- il sera H — F, et le problème est ainsi ramené à chercher : 1° le poids de d'air sec à t degrés et à la pression H — F; 2° le poids de V litres de va- turée à t degrés et à la pression F.

' résoudre la première partie du problème, on sait qu'un litre d'air sec à à la pression 76 pèse 1gr,293, et qu'à t degrés et à la pression H — F il $\frac{1,293(H-F)}{(1+\alpha t)76}$ (320, prob. VI); donc V litres d'air pèsent

$$\frac{1^{gr},293\,V(H-F)}{(1+\alpha t)76}\ [1].$$

, pour obtenir le poids de la vapeur, il faut d'abord chercher le poids d'un lume d'air sec, à la même température et à la même pression, puis le er par la densité de la vapeur (320, prob. VII). Or V litres d'air sec, à et à la pression F, pesant $\frac{1^{gr},293\,V\times F}{(1+\alpha t)76}$, V litres de vapeur, dont la den- $\frac{5}{8}$, pèsent

$$\frac{1^{gr},293\,V\times F\times 5}{(1+\alpha t)76\times 8}\ [2].$$

Donc, enfin, le poids cherché P égalant la somme des poids [1] et [2], on a

$$P = \frac{1^{gr},293\,V(H-F)}{(1+\alpha t)\,76} + \frac{1^{gr},293\,V \times F \times 5}{(1+\alpha t)\,76 \times 8} = \frac{1^{gr},293\,V}{(1+\alpha t)\,76}\left(H - \frac{3}{8}F\right).$$

* ÉTAT SPHÉROÏDAL

374. **Expériences de Boutigny.** — Les liquides versés sur des surfaces métalliques incandescentes présentent des phénomènes remarquables, observés pour la première fois par Leidenfrost, il y a un siècle, et étudiés ensuite par quelques physiciens; mais c'est Boutigny qui a fait connaître les expériences curieuses dont nous allons exposer les principales.

Ayant chauffé jusqu'au rouge une capsule d'argent ou de platine, à parois épaisses, si l'on y verse quelques grammes d'eau au moyen d'une pipette, on remarque que le liquide ne s'étale pas dans la capsule et ne la mouille pas, comme il le ferait à la température ordinaire, mais qu'il prend la forme d'un globule aplati, ce que Boutigny exprime en disant que le liquide passe à l'état *sphéroïdal*. A cet état, l'eau est animée d'un mouvement gyratoire rapide sur le fond de la capsule, et non-seulement elle n'entre pas en ébullition, mais elle se vaporise 50 fois plus lentement que s'il y avait ébullition. Enfin, si la capsule se refroidit, il vient un moment où elle n'est plus assez chaude pour maintenir l'eau à l'état sphéroïdal. Ses parois sont alors mouillées par le liquide, et une ébullition violente se manifeste tout à coup.

Tous les liquides peuvent prendre l'état sphéroïdal, et la température nécessaire pour que le phénomène se produise est d'autant plus élevée, que le point d'ébullition du liquide l'est lui-même davantage. Pour l'eau, la capsule doit être chauffée au moins à 200 degrés; pour l'alcool, à 134.

Boutigny a observé que la température des liquides à l'état sphéroïdal est constamment inférieure à celle de leur ébullition. L'eau, par exemple, reste à 95°,5; l'alcool, à 75°,5; l'éther, à 34°; l'acide sulfureux, à —10°,5. Mais la température de la vapeur qui se dégage est égale à celle de la capsule, d'où l'on doit conclure que cette vapeur ne se produit pas dans la masse du liquide.

Cette propriété des liquides à l'état sphéroïdal, de se maintenir à une température inférieure à celle de leur point d'ébullition, a conduit Boutigny à une expérience remarquable, celle de la congélation de l'eau dans une capsule incandescente. Ce physicien chauffe au rouge blanc une capsule de platine et y verse quelques grammes d'acide sulfureux anhydre. Ce liquide, qui ne bout qu'à —10 degrés, se comporte dans la capsule comme on l'a vu ci-dessus, c'est-à-dire que sa température s'abaisse au-dessous de —10 degrés. Si alors on ajoute à l'acide sulfureux une petite quantité d'eau, celle-ci, refroidie par l'acide, se congèle instantanément, et la capsule étant encore rouge, on en retire, non sans difficulté, un morceau de glace.

A l'état sphéroïdal, il n'y a point contact entre le liquide et le corps chaud. Boutigny s'en est assuré en faisant rougir une plaque d'argent disposée bien horizontalement, et en versant dessus un gramme d'eau colorée en noir. Ce liquide passe à l'état sphéroïdal; or, si l'on place la flamme d'une bougie à une certaine distance sur le prolongement de la plaque, on distingue nettement et d'une manière continue cette flamme entre le sphéroïde d'eau et la plaque. On conclut de là que le liquide se maintient à une petite distance de celle-ci, ou qu'il fait des vibrations assez rapides pour que l'œil ne puisse les distinguer.

Pour expliquer les phénomènes que présentent les liquides à l'état sphéroïdal, on admet que le globule liquide est soutenu à distance du vase par la tension de la vapeur qui se produit à sa surface, en sorte que le liquide, n'étant pas chauffé par contact, mais seulement par rayonnement, ne se vaporise que lentement, surtout si l'on observe que l'eau étant diathermane pour les rayons émis d'une source intense (435), une grande partie de la chaleur rayonnante la traverse sans l'é-

[redacted]

ntigny pense que la cause qui empêche le liquide de mouiller le
e force répulsive qui serait d'autant plus intense que la tempéra-
s élevée. Cette hypothèse s'accorde avec l'expérience suivante de
Angleterre. Un robinet ayant été posé sur un générateur de vapeur,
a niveau de l'eau, le liquide ne s'écoulait pas par le robinet lorsque
générateur étaient portées à une très-haute température, quoique
ntérieure fût considérable; mais, à une température moins élevée,
illissait avec force.

* DENSITÉS DES VAPEURS

ode de Gay-Lussac. — La *densité d'une vapeur* est le rapport entre
certain volume de cette vapeur et celui d'un même volume d'air, à
et à tension égales.

hodes ont été suivies pour déterminer les densités des vapeurs : la
e à Gay-Lussac, est applicable aux
ntrent en ébullition au-dessous de
u peu au-dessus; la seconde, due à
permet d'opérer à des températures
aller jusqu'à 360 degrés environ.

308 représente l'appareil de Gay-
compose d'une marmite de fonte
ercure dans lequel plonge un man-
re M. Celui-ci est plein d'eau ou
t la température est indiquée par
tre T. Dans l'intérieur du manchon
he C graduée en litres et fraction

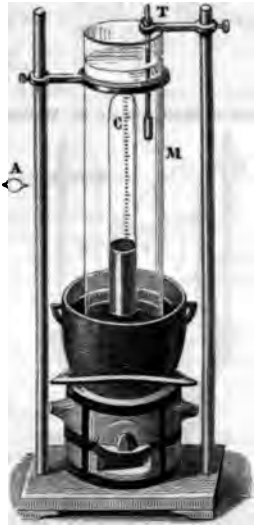


Fig. 308.

rimenter avec cet appareil, on in-
uide à vaporiser dans une petite
verre comme celle qui est repré-
, à gauche de la figure; fermant
ampoule à la lampe, on la pèse,
chant du poids obtenu celui de
and elle était vide, on a le poids
troduit. Ayant rempli la cloche C
on y fait passer l'ampoule, et on
uellement jusqu'à ce que l'eau du
signe une température supérieure
degrés à celle à laquelle le liquide
entre en ébullition. Celle-ci éclate
vaporisation du liquide qu'elle con-
tension de la vapeur déprime le
s la cloche, comme on le voit dans la figure. Il importe que l'am-
ses petite pour que tout le liquide qu'on y a introduit soit réduit
'est ce qui a lieu lorsque le bain ayant atteint la température d'ébul-
uide de l'ampoule, le niveau du mercure est cependant un peu plus
rieur de la cloche qu'à l'extérieur. Cela montre, en effet, qu'il ne
us la cloche, de liquide non vaporisé; car alors le niveau intérieur
ne qu'à l'extérieur (358). On est donc certain que le poids du liquide
ns l'ampoule représente exactement le poids de la vapeur qui s'est
la cloche C. Quant au volume de cette vapeur, il est connu au moyen
graduée qui est sur la cloche. Sa température est donnée par le ther-
et la pression égale la hauteur du baromètre, moins celle du mer-
te dans la cloche.

Après avoir ainsi déterminé le volume v de la vapeur en litres, son en grammes, sa température t, et sa pression $H-h$, H étant la hau baromètre et h celle du mercure dans la cloche, il reste à calculer le d'un même volume d'air à t degrés et à la pression $H-h$.

1 litre d'air à zéro et à la pression $0^m,76$ pesant $1^{gr},293$, v litres pèsent 1^{gr} Mais on a vu (320, prob. VI) qu'on passe du poids à zéro au poids à en divisant par $1+\alpha t$, α étant le coefficient de dilatation de l'air; tres d'air, à t degrés et encore à la pression $0^m,76$, pèsent $\frac{1^{gr},293\times v}{1+\alpha t}$

Enfin, d'après la loi de Mariotte, le poids de l'air à la pression H- duit du poids à la pression $0^m,76$, en multipliant par $\frac{H-h}{0^m,76}$. Donc l de l'air sous le même volume que la vapeur, et à température et à pres est $\frac{1^{gr},293\times v(H-h)}{(1+\alpha t)\times 0^m,76}$. Par conséquent, on a, pour la densité cher

$$D=\frac{p}{p'}=\frac{p(1+\alpha t)\,0^m,76}{1^{gr},293\,v(H-h)}.$$

376. **Méthode de M. Dumas.** — Le procédé que nous venons de d pas applicable aux liquides dont le poi tion surpasse 150 ou 160 degrés. En porter à cette température l'huile dont alors le manchon, il faut chauffer le m est dans la marmite à un degré beaucoup auquel il se dégage des vapeurs mercu la tension, sous la cloche, s'ajoute à vapeur sur laquelle on expérimente, ce une cause d'erreur. Elle disparaît dans suivant dû à M. Dumas.

Fig. 309.

L'appareil consiste en un ballon de demi-litre de capacité environ. Après l séché à l'intérieur et à l'extérieur, on pois quand il est plein d'air sec à la et à la température ambiante t. Puis, troduit la substance, soit liquide, soit on cherche la densité de vapeur, on plon dans un bain d'eau saturée de sel, ou d d'huile de pied de bœuf ou d'alliage suivant la température d'ébullition de l qui est dans le ballon (fig. 309).

Afin de maintenir celui-ci dans le ba sur l'une des anses de la marmite qui une tige de fer, le long de laquelle pe support de même métal. Ce support porte deux anneaux entre lesqu le ballon. Sur l'autre anse, une tige semblable à la première porte mètre à poids D.

Ayant plongé le ballon et le thermomètre dans le bain, on cha de la température d'ébullition de la substance qui est dans le ba peur, en se dégageant par la pointe effilée, chasse l'air qui est dan Au moment où cesse le jet de vapeur, ce qui a lieu lorsque tout e on ferme à la lampe, avec un chalumeau, la pointe effilée du ballo soin de noter aussitôt la température t' du bain et la hauteur H' d Enfin, lorsque le ballon est refroidi et essuyé avec soin, on le pèse

contenue dans le ballon à t' degrés et à la pression H' est

le poids P'' de l'air que contiendrait le ballon dans les condi-

ture et de pression t' et H', on a $D = \frac{P'}{P''} = \frac{P+Q}{P''}$.

l'air dans le ballon quand on y introduit le mercure, le bal-
rait pas complétement; mais le volume du mercure introduit
ujours le volume de la vapeur.

nsités de quelques vapeurs par rapport à l'air.

. . . . .	1,0000	Vapeur de phosphore.	4,420.
. . . . .	0,6235	— d'essence de térébenthine.	5,0130
. . . . .	1,6138	— de mercure	6,976.
. . . . .	2,206.	— d'iode . . . . . : .	8,716.
ulfurique . .	2,5860		
e de carbone.	2,6447		

e MM. Sainte-Claire Deville et Troost. — Pour les substances
ébullition qu'à des températures supérieures à celle de la fusion
Sainte-Claire Deville et Troost ont modifié la méthode de M. Du-
ant le ballon de verre par un ballon de porcelaine de Bayeux
ong et étroit, muni d'un bouchon conique de même substance,
eurs se dégager, et qu'on fond au chalumeau à gaz oxy-hydro-
ù le jet de vapeur cesse. Le ballon est maintenu dans une étuve
cure, ou de soufre, de cadmium, de zinc, et se trouve ainsi
l'ébullition de ces substances, laquelle est connue d'a-
de 350, 450, 860 et 1080 degrés. Enfin, au lieu de com-
ée à celle de l'air prise pour unité, on la compare à celle de
uf fois plus grande. Le coefficient de dilatation du ballon
gulite entièrement comme dans la méthode de M. Dumas

à zéro, et par α le coefficient de dilatation de l'air, on a $P' = \frac{P}{1+\alpha t}$. Pa quent, le poids d'un litre d'air sec à 100 degrés est

$$\frac{1^{gr},293}{1+0,00367\times 100} = \frac{1^{gr},293}{1,367} = 0^{gr},946.$$

Par suite, un litre de vapeur saturée, à 100 degrés et à la pression 0^m,

$$0^{gr},946 \times 0,6235 = 0^{gr},5898.$$

Pour avoir, à la même température et à la même pression, le volum cupé par 1 gramme de vapeur, il n'y a qu'à diviser 1 gr. par $0^{gr},5898$;

$$V = 1^{lit},695 = 1695 \text{ centimètres cubes.}$$

En se transformant en vapeur à 100 degrés et à la pression 0^m76, l'e donc un volume près de 1700 fois plus grand qu'à l'état liquide.

CHAPITRE VI

HYGROMÉTRIE

379. **Objet de l'hygrométrie.** — L'*hygrométrie* a pour o déterminer la quantité de vapeur d'eau contenue dans un v d'air déterminé. Cette quantité est très-variable; mais l'ai jamais saturé de vapeur d'eau, du moins dans nos climats. non plus jamais complétement sec; car si l'on y expose de stances *hygrométriques*, c'est-à-dire ayant une grande pour l'eau, comme le chlorure de calcium, l'acide sulfuriq tout temps, elles absorbent de la vapeur d'eau.

380. **État hygrométrique.** — L'air n'étant point, en géné turé, on nomme *état hygrométrique* ou *fraction de sat* de l'air le rapport de la quantité actuelle de vapeur d'e renferme à la quantité qu'il contiendrait s'il était saturé, pérature égale. Le degré d'humidité de l'air ne dépend pa quantité absolue de vapeur d'eau qu'il contient, mais de tance à laquelle cette vapeur se trouve de l'état de saturation. lorsqu'il est froid, peut être très-humide avec peu de vape très-sec, au contraire, avec une plus grande quantité, lo est chaud. Par exemple, l'air contient, en général, plus d'e que l'hiver, et cependant il est moins humide, parce que, l pérature étant plus élevée, la vapeur est plus loin de son de saturation. De même, lorsqu'on chauffe un appartem ne diminue point la quantité de vapeur qui est dans l'air; m diminue l'humidité de celui-ci, parce qu'on recule son po saturation. L'air peut même devenir alors assez sec pour n l'économie animale; c'est pour cela qu'il est bon de placer poêles des vases contenant de l'eau.

représentant par f la tension de la vapeur qui est dans l'air, eur saturée à la même température, et par E l'état hygro-

$\frac{f}{F}$, d'où $f = F \times E$.

uence de la seconde définition ci-dessus, la tem-
arié, l'air peut contenir la même quantité de va-
nt ne pas avoir le même état hygrométrique. En
température s'élève, la force élastique de la va-
drait l'air, à l'état de saturation, croît plus rapi-
rce élastique de la vapeur qui se trouve actuelle-
t alors le rapport de ces forces, c'est-à-dire l'état
devient plus petit.

ot (389) comment de l'état hygrométrique on dé-
la vapeur contenue dans un volume donné d'air.

s espèces d'hygromètres. — On nomme *hygro-*
ments qui servent à déterminer l'état hygromé-
n en a imaginé un fort grand nombre, qu'on peut
e sortes principales : les *hygromètres chimiques*,
à absorption, les *hygromètres à condensation*,
ètres.

ètre chimique. — Le procédé de l'hygromètre chi-
à faire passer un volume connu d'air sur une
d'eau, sur du chlorure de calcium, par exemple,
ubstance avant le passage de l'air et la pesant
un excès de poids, qui est celui de la vapeur
ne dans l'air. Pour faire passer à volonté un vo-

par l'intermédiaire d'un tube de caoutchouc, avec une série de tubes M, N, remplis de chlorure de calcium ou de pierre ponce sulfurique. Le premier de ces tubes, N, est destiné à absorber la vapeur d'eau contenue dans l'air aspiré; le second, M, arrête la vapeur qui tend à passer des réservoirs dans le tube N.

Le réservoir inférieur étant plein d'eau et l'autre plein d'air,

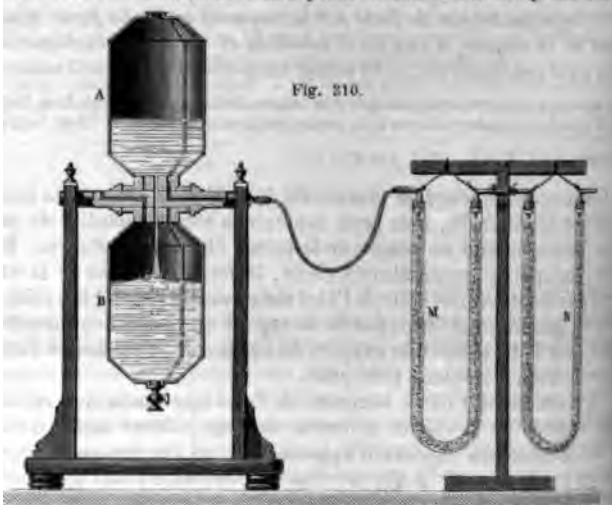


Fig. 310.

on fait basculer l'appareil, de manière que le liquide s'écoule lentement de A en B. Le vide se faisant en A, l'air rentre par les tubes N, M, dans le premier desquels toute la vapeur est absorbée. Quand toute l'eau s'est écoulée en B, on fait basculer de nouveau l'appareil; le même écoulement recommence et le même volume d'air est aspiré à travers le tube N. Si la capacité de chaque réservoir est de 10 litres, et qu'on ait fait basculer cinq fois l'appareil, 50 litres d'air ont traversé le tube N et s'y sont desséchés. Si donc, avant l'expérience, on a pesé ce tube avec les matières qui sont dedans, et si on le pèse après, l'excès de poids donne la quantité de vapeur d'eau contenue dans 50 litres d'air au moment de l'expérience. De ce poids on déduit l'état hygrométrique de l'air. Ce procédé est le plus précis; mais il n'offre pas le degré de simplicité nécessaire dans les observations météorologiques.

383. **Hygromètre à absorption.** — Les hygromètres à absorption sont fondés sur la propriété qu'ont les substances organiques de s'allonger par l'humidité et de se raccourcir par la sécheresse. On

ıurs hygromètres à absorption. Le plus en usage
' *à cheveu*, ou *hygromètre de Saussure*, du nom
quel il est dû. Il se compose d'un cadre de cuivre
quel est tendu un cheveu *c*, dégraissé préalable-
au contenant un centième de son poids de sous-
de. On peut aussi dégraisser le cheveu en le plon-
ther sulfurique pendant 24 heu-
ı fait M. Regnault. Si le cheveu
ssé, il n'absorberait que peu de
ongement serait très-faible, tan-
ssé de toute matière grasse, il
ıent en passant de la sécheresse

st maintenu, à son bout supé-
ıce *a* serrée par une vis de pres-
nce s'élève ou s'abaisse, pour
ı, au moyen d'une vis *b* dont
dessus de *a*, est fixe. Si le che-
l en résulterait une torsion qui
ment irrégulier. A sa partie in-
ıule sur une poulie à deux gor-
: il est fixé. Sur la deuxième
en sens contraire du cheveu, un
pporte un petit poids *p*. Enfin,
porte une aiguille qui se meut
ıdué. Quand le cheveu se rac-
on relève l'aiguille; lorsqu'il s'allonge, c'est le
t descendre.

Fig. 311 (h=27).

le cadran, on marque zéro au point où, à la
naire, l'aiguille s'arrête dans de l'air complète-
ıt 100 au point où elle s'arrête dans de l'air sa-
'eau; puis on partage l'intervalle de ces deux
ties égales, qui sont les degrés de l'hygromètre.
int d'extrême sécheresse, se détermine en pla-
ı sous une cloche de verre dont on dessèche l'air
ces très-avides d'eau, comme du chlorure de
ırbonate de potasse calciné. L'air perdant son
'eu se raccourcit et fait tourner la poulie et son
ès-lentement. Au bout de quinze à vingt jours
ille devient stationnaire, ce qui indique que
ı est complétement desséché. On marque alors
ı, au point correspondant à l'aiguille.
oint d'extrême humidité en retirant les matières

desséchantes de la cloche, et en mouillant ses parois avec d distillée. Celle-ci, se vaporisant, sature bientôt l'air de la c et le cheveu s'allonge rapidement. Le poids p, dont le fi roule sur la poulie en sens contraire du cheveu, fait alors t l'aiguille à l'opposé du zéro. En moins de deux heures, c stationnaire, et l'on marque 100 au point où elle s'arrête.

D'après Saussure, un cheveu tendu par un poids de 5 grammes s'allonge, de zéro à 100, de $\frac{1}{16}$ de sa longueur, c d'environ 20 centimètres. Les cheveux blonds sont ceu l'allongement est le plus régulier.

On néglige la dilatation qu'éprouve le cheveu par les var de température, parce qu'on a reconnu que, pour une différe 33 degrés dans la température de l'air, l'allongement du c ne fait varier l'aiguille que des $\frac{3}{4}$ d'un degré de l'hygro Abstraction faite de cette faible dilatation, on observe que, que soit la température, l'aiguille de l'hygromètre revie jours exactement au zéro dans l'air parfaitement sec, et à 10 l'air saturé. La fixité de ce dernier point montre que, da saturé, le cheveu absorbe toujours la même quantité quelles que soient la température et la densité de la vapeur.

Les hygromètres à cheveu offrent plusieurs inconvénient struits avec des cheveux divers, leurs indications peuvent de plusieurs degrés, quoique d'accord aux deux points ext De plus, un même hygromètre ne reste pas comparable même, le cheveu s'allongeant par la tension prolongée du qu'il supporte. C'est pourquoi le meilleur système de grad est un cadran entier, à zéro arbitraire, sur lequel on déte de temps en temps la position des points d'extrême sèchere d'extrême humidité. L'hygromètre à cheveu présente encor convénient de ne pas donner immédiatement l'état hygromé de l'air; il faut avoir recours à la table suivante.

384. **Table de correction par Gay-Lussac.** — L'expérienc montre que les indications de l'hygromètre à cheveu ne sont proportionnelles à l'état hygrométrique de l'air. Par exe lorsque l'aiguille marque 50 degrés, nombre qui correspo milieu du cadran, l'air est loin d'être à moitié saturé. Il a fallu trouver expérimentalement l'état hygrométrique corre dant à chaque degré de l'instrument. Gay-Lussac a résolu c blème en se fondant sur ce principe, que les vapeurs fourni une dissolution saline ou acide ont une tension maximum tant plus faible, pour une même température, que la quant sel ou d'acide dissous est plus considérable (350).

Ce savant plaçait l'hygromètre à cheveu sous une cloche

elle était un mélange d'eau et d'acide sulfurique, et il notait gré de l'hygromètre lorsque l'air de la cloche était saturé. obtenir la tension correspondante de la vapeur sous la clo- il faisait passer dans le vide d'un baromètre quelques gouttes même dissolution acide qui était sous la cloche. La dépres- du mercure dans le baromètre lui donnait alors la tension de peur dans la cloche, puisqu'à l'état de saturation et à tempé- e égale, la force élastique d'une vapeur est la même dans le que dans l'air (372, 1°). Cherchant enfin, dans les tables des s élastiques, la tension de la vapeur saturée, à la tempéra- de l'air sous la cloche, il avait les deux termes du rapport représentait l'état hygrométrique de l'air correspondant au é marqué par l'hygromètre (380). C'est en répétant ce mode périence avec des dissolutions acides plus ou moins concen- s, et à la température de 10 degrés, que Gay-Lussac a trouvé termes de la table suivante; les autres ont ensuite été déter- s par Biot, à l'aide de formules d'interpolation.

ts hygrométriques correspondants aux degrés de l'hygromètre à cheveu à la température de 10 degrés.

DEGRÉS D'HYGROMÈTRE	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES	DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES
0	0,000	55	0,318
5	0,022	60	0,363
10	0,046	65	0,414
15	0,070	70	0,472
20	0,094	72	0,500
25	0,120	75	0,538
30	0,148	80	0,612
35	0,177	85	0,696
40	0,208	90	0,791
45	0,241	95	0,891
50	0,278	100	1,000

ette table fait voir que ce n'est qu'à 72 degrés que l'air est à lé saturé. Comme c'est à ce point que correspond le plus sou- l'aiguille de l'hygromètre à la surface du sol, on en conclut l'air contient, en moyenne, la moitié de la vapeur qu'il con- rait s'il était saturé. Dans nos climats, l'hygromètre ne des- l jamais jusqu'à 100 degrés, même après les pluies les plus ndantes. Pendant les plus grandes sécheresses, il monte rare- t au delà de 30 degrés. Lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, arche, en général, vers zéro.

Selon Gay-Lussac, sa table de graduation était applicable à tous les hygromètres à cheveu. Mais M. Regnault a reconnu que les indications de ces instruments varient avec l'origine des cheveux, leur couleur, leur finesse, le mode de dégraissage; en sorte que, pour obtenir des indications précises, il faut une table particulière pour chaque hygromètre : ce qui fait voir combien ces instruments offrent d'incertitude et de difficulté.

* 385. **Hygromètre à condensation de Daniell.** — Les hygromètres à condensation ont pour but de faire connaître, par le refroidissement de l'air, à quelle température la vapeur qu'il contient serait suffisante pour le saturer : tels sont l'hygromètre de Daniell et celui de M. Regnault.

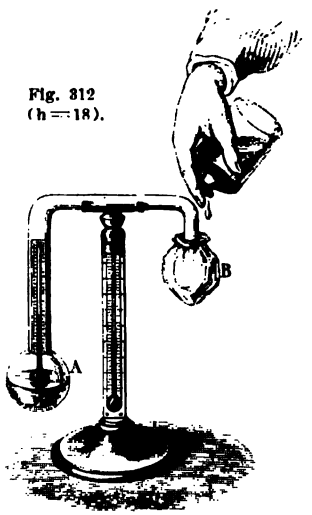


Fig. 312 (h = 18).

L'*hygromètre de Daniell* se compose de deux boules de verre réunies par un tube deux fois recourbé (fig. 312). La boule A est aux deux tiers remplie d'éther, dans lequel plonge un petit thermomètre renfermé dans le tube. Les deux boules et le tube sont complétement purgés d'air, ce qui s'obtient en faisant bouillir l'éther qui est dans la boule A, tandis que la boule B est encore ouverte, et en fermant celle-ci à la lampe lorsqu'on juge que les vapeurs d'éther ont entraîné tout l'air, de sorte que le tube et la boule B ne contiennent que de la vapeur d'éther.

La boule B étant enveloppée de mousseline, on verse dessus, goutte à goutte, de l'éther. Ce liquide, en se vaporisant, refroidit la boule (364) et condense les vapeurs qu'elle contient. La tension intérieure étant alors diminuée, l'éther de la boule A donne aussitôt de nouvelles vapeurs qui viennent se condenser de même dans l'autre boule, et ainsi de suite. Or à mesure que le liquide distille ainsi de la boule inférieure à la boule supérieure, l'éther qui est dans la première se refroidit, et il vient un moment où l'air qui est en contact avec la boule A, et qui se refroidit à elle, atteint la température à laquelle la vapeur d'eau qu'il contient est suffisante pour le saturer. Cette vapeur se condense alors, et l'on voit se déposer sur la boule A une couche de rosée

ous la forme d'un anneau qui entoure la surface du liquide; 'est là, en effet, que se produit surtout le refroidissement dû à évaporation. Le thermomètre intérieur indique, à cet instant, ı température du *point de rosée*, c'est-à-dire la température de turation de l'air ambiant.

Pour obtenir ce point avec plus d'approximation, on observe la mpérature au moment où la vapeur précipitée disparaît par le chauffement, et l'on prend la moyenne entre cette température l celle de la précipitation. Il est bon que, pendant cette expé-ence, l'hygromètre soit placé dans un courant d'air, sur une fe-tre ouverte, par exemple, afin que l'évaporation de l'éther sur la nseline soit plus rapide. La température de l'air est donnée r un thermomètre placé sur le pied même de l'appareil.

L'hygromètre de Daniel ayant ainsi fait connaître la tempéra-re à laquelle l'air serait saturé, il s'agit d'en déduire l'état hygro-métrique. Pour cela, observons que, dans un espace libre qui con-ent un mélange d'air et de vapeur à la pression atmosphérique, rsque la température baisse, la force élastique de la vapeur reste nstante jusqu'au point de saturation. En effet, la force élastique mélange égale la somme des forces élastiques de chaque fluide 72, 2°); or, pendant que l'air se refroidit, sa tension reste inva-ble, augmentant autant par la diminution de volume qu'elle ecroît par l'abaissement de température. La tension de la vapeur oit donc aussi demeurer invariable, puisque la force élastique du mélange reste nécessairement égale à la pression de l'atmosphère, près le refroidissement comme avant. Par conséquent, *lorsque air se refroidit, la tension de la vapeur qu'il contient reste nstante jusqu'au point de saturation, et, à ce point, cette nsion est la même qu'avant le refroidissement.*

D'après ce principe, si l'on cherche, dans les tables des forces astiques, la tension *f* correspondante à la température du point rosée, cette tension sera précisément celle que possède la va-ur d'eau qui est dans l'air au moment de l'expérience. Si donc on cherche, dans les mêmes tables, la tension F de la vapeur saturée, la température de l'air, le quotient de la tension *f* divisée par la nsion F représentera l'état hygrométrique de l'air (380). Par mple, la température de l'air étant 15 degrés, supposons que thermomètre de la boule A marque 5 degrés au moment où se le dépôt de rosée. En cherchant, dans les tables des forces astiques, les tensions correspondantes à 5 et à 15 degrés, on trou-*f* égale à $6^{mm},544$, et F égale à $12^{mm},699$: ce qui donne 0,514 r le rapport de *f* à F, ou pour l'état hygrométrique.

L'hygromètre de Daniell offre plusieurs causes d'erreur : 1° l'é-

vaporation dans la boule A ne refroidissant le liquide qu'à la surface, le thermomètre qui y plonge ne peut donner avec précision la température du point de rosée ; 2° l'observateur, se tenant auprès de l'appareil, modifie l'état hygrométrique de l'air ambiant, ainsi que sa température.

* 386. **Hygromètre de M. Regnault.**— M. Regnault a construit un hygromètre à condensation qui ne présente pas les causes d'erreur de celui de Daniell. Cet instrument se compose de deux dés d'argent, à parois minces et polies, de 45 millimètres de hauteur et 20 de diamètre (fig. 313). Dans ces dés s'ajustent deux tubes de verre D et E. Chacun d'eux contient un thermomètre très-sensible fixé à l'aide d'un bouchon. Le bouchon du tube D est traversé par un tube A ouvert à ses deux bouts et plongeant jusqu'au fond du dé. De plus, le tube D est mis en communication par le pied même du support et par un tuyau de plomb avec un aspirateur G rempli d'eau. Le tube E ne communique pas avec l'aspirateur; il

Fig. 313 (h=40).

contient seulement un thermomètre destiné à faire connaître la température de l'air au moment de l'expérience.

Pour faire fonctionner l'hygromètre, on verse de l'éther dans tube D, jusqu'à moitié environ, puis on ouvre le robinet de l'-

. L'eau qui remplit celui-ci s'écoule, et l'air se raréfie
ube D. Par l'effet de la pression atmosphérique, de l'air
ors par le tube A; mais comme cet air ne peut pénétrer
ube D et dans l'aspirateur qu'en passant au travers de l'é-
aporise une partie de ce liquide, et le refroidit ainsi d'au-
vite, que l'écoulement est plus rapide. Il vient un mo-
le refroidissement détermine sur le dé un dépôt de ro-
même que dans l'hygromètre de Daniell; le thermomètre
nt alors la température correspondante, on a les éléments
res pour calculer l'état hygrométrique.
et instrument, toute la masse d'éther est à la même tem-
, à cause de l'agitation que lui imprime le courant d'air;
les observations se font à distance au moyen d'une lu-
e cette manière, toute cause d'erreur est écartée.

Hygroscopes. — On nomme *hygroscopes* des appareils qui
t bien s'il y a plus ou moins de vapeur d'eau dans l'air,
n'en font pas connaître la quantité. On
ruit de plusieurs sortes : les plus em-
ont ceux auxquels on donne la forme de
rsonnages dont la tête se couvre ou se
d'un capuchon, selon que l'air est plus
s humide. Ces instruments sont fondés
opriété qu'ont les cordes et les boyaux
se détordre par l'action de l'humidité,
tordre davantage par la sécheresse.
dications sont dues à un petit bout de
rdu, fixé par l'une de ses extrémités,
ue l'autre s'attache à la pièce mobile.
roscopes sont paresseux, c'est-à-dire
marchant que très-lentement, leurs in-
sont toujours en retard sur les varia-
rométriques de l'air; de plus, ils sont
sensibles.

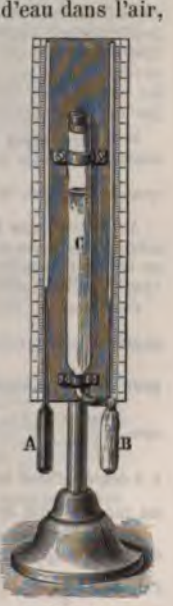


Fig. 314.

ychromètre. — Le *psychromètre* (mesure de la
est destiné, comme l'hygromètre, à faire con-
egré d'humidité de l'air. L'idée première en est
e; mais c'est August qui lui a donné la dispo-
sentée dans la figure 314. Il se compose de deux
res A et B fixés parallèlement sur une plaque
Entre eux est un tube C contenant de l'eau dis-
réservoir B étant enveloppé de mousseline, une
coton, partant de l'extrémité inférieure du tube C, amène l'eau sur la
et la maintient humectée. Refroidi ainsi par l'évaporation qui se pro-
rface, le thermomètre B marque constamment une température d'au-
ase au-dessous de celle du thermomètre A, que l'évaporation est plus

rapide, c'est-à-dire que l'air est moins humide. D'où l'on déduit la tension x d
la vapeur dans l'air ambiant par la formule

$$A(t-t') = \frac{F'-x}{H} \text{ [1]},$$

dans laquelle t représente la température du thermomètre sec, t' celle du the
momètre mouillé, F' la tension de la vapeur saturée à t' degrés, H la press
atmosphérique, et A un coefficient indéterminé.

Dans la formule [1], le premier membre représente la chaleur que reçoit
thermomètre mouillé, laquelle, d'après la loi de Newton (419), est proporti
nelle à la différence $t-t'$, et le second membre représente la chaleur enle
par l'évaporation, laquelle, d'après Dalton, est directement proportionnelle
la différence $F'-x$, et inversement proportionnelle à H. Or lorsque le therm
mètre mouillé a pris une température fixe t', les quantités de chaleur qu'il p
et qu'il reçoit sont nécessairement égales, ce qui donne l'équation [1].

Pour en faire usage, il faut commencer par déterminer A : à cet effet, on m
sure x à l'aide de l'hygromètre de M. Regnault, et substituant la valeur si
trouvée à la place de x dans l'équation [1], celle-ci donne, pour une valeur p
ticulière de $t-t'$, de F' et de H, une valeur de A, qui, portée comme consta
dans la même équation, la rend ensuite propre à faire connaître les valeurs d
correspondantes aux différentes valeurs de t et de t' fournies par l'observation
psychromètre. Toutefois, M. Regnault ayant constaté que A varie de 0,0007
0,00130, suivant que l'air est très-sec ou très-humide, et que ce coefficient v
encore avec la rapidité du renouvellement de l'air, et selon que le psychrom
est placé à l'air libre ou à l'intérieur, il en résulte que les indications four
par cet instrument présentent toujours quelque incertitude.

389. **Problèmes sur l'hygrométrie.** — I. Calculer le poids de la vapeur d'
contenue dans un volume d'air V à la température t, l'hygromètre à cheveu m
quant m degrés, et la densité de la vapeur par rapport à l'air étant $\frac{5}{8}$.

Au moyen de la table de Gay-Lussac (384), on trouve l'état hygrométriq
correspondant à m degrés de l'hygromètre, et dans les tables des forces élastiq
on trouve la tension F de la vapeur saturée à t degrés; d'où l'égalité $f = F$
(380) fait connaître la force élastique f de la vapeur dont on cherche le po

Cela posé, un litre d'air à zéro et à la pression 76 pesant $1^{gr},293$, son poids
degrés et à la pression f est $\frac{1^{gr},293 \times f}{(1+\alpha t)\,76}$ (320, prob. VI). Par suite, 1 litre de
peur dont la densité est $\frac{5}{8}$, pèse, à la même température et à la même p
sion, $\frac{1^{gr},293 \times f \times 5}{(1+\alpha t)\,76 \times 8}$. Donc le poids de la vapeur contenue dans V litres d
à t degrés, l'état hygrométrique étant E, est $\frac{1^{gr},293 \times V \times f \times 5}{(1+\alpha t)\,76 \times 8}$, valeur
est indépendante de la pression atmosphérique.

II. Calculer le poids P d'un volume d'air humide V, dont l'état hygrométri
est E, la température t et la pression H, la densité de la vapeur par rappo
l'air étant $\frac{5}{8}$.

Il faut observer que le volume d'air donné n'est autre chose, d'apr
deuxième loi des mélanges des gaz et des vapeurs, qu'un mélange de V l
d'air sec à t degrés et à la pression H diminuée de celle de la vapeur, et de V l
de vapeur à t degrés et à la tension donnée par l'état hygrométrique; c'est
séparément le poids de l'air et celui de la vapeur qu'il s'agit de trouver.

des deux poids obtenus et réduisant, on a

$$P = \frac{1^{gr},293\,V\left(H - \frac{3}{8}FE\right)}{(1+\alpha t)\,76} \quad [A].$$

saturé, on aurait $E = 1$, et alors cette formule se changerait en
rée pour les mélanges des gaz et des vapeurs saturées (373, prob. III).
e, P représente le poids d'un litre d'air à la température t, à la
à l'état hygrométrique E; c'est-à-dire la quantité a qui entre
les données précédemment pour la correction des poids spécifiques
des liquides (318).

[A] contenant, outre le poids P, plusieurs quantités variables V,
ent, en prenant successivement chacune de ces quantités pour in-
poser autant de problèmes dont on obtiendrait la solution en résol-
[A] par rapport à V, à E, à H ou à t. On va en voir un
question suivante.

à t degrés et à la pression H le volume d'un poids d'air P dont
trique est E, la densité de la vapeur étant $\frac{5}{8}$, et sa tension maxi-
grés étant connue par les tables des forces élastiques.

r rapport à V l'équation [A] du problème précédent, on trouve

$$V = \frac{P(1+\alpha t)\,76}{1^{gr},293\left(H - \frac{3}{8}FE\right)} \quad [B].$$

ut résoudre ce problème directement. Pour cela, le poids P étant
air sec à t degrés et à la pression $H - FE$, et de vapeur à t degrés
, soient x le poids de l'air et y le poids de la vapeur; d'après
$x + y = P$ [1]. Mais la densité de la vapeur étant les $\frac{5}{8}$ de celle de

Le poids de l'air une fois connu, on aura son volume en litres en ch combien de fois ce poids contient celui d'un litre d'air à t degrés et à la H — FE. Or 1 litre d'air à zéro et à la pression 76 pesant $1^{gr},293$, son poi grés et à la pression H — FE est $\frac{1^{gr},293(H-FE)}{(1+\alpha t)76}$. Donc

$$V=\frac{P(H-FE)}{H-\frac{3}{8}FE}\cdot\frac{1^{gr},293(H-FE)}{(1+\alpha t)76}=\frac{P(1+\alpha t)76}{1^{gr},293\left(H-\frac{3}{8}FE\right)},$$

formule qui est la même que la formule [B] obtenue ci-dessus.

CHAPITRE VII

CALORIMÉTRIE, ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHAL

390. **Objet de la calorimétrie, calorie.** — L'objet de la *calorim* mesurer la quantité de chaleur que les corps perdent ou gagnent l température s'abaisse ou s'élève d'un nombre de degrés connu, ou lors gent d'état.

On ne peut mesurer la quantité absolue de chaleur perdue ou ga corps, mais seulement la quantité relative, c'est-à-dire le rapport ent tité absolue perdue ou gagnée par le corps et celle que perd ou gag corps dans les mêmes conditions. Le corps qu'on a choisi pour terme d son est l'eau, et l'on est convenu de prendre pour *unité de chaleu* la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré la tem 1 kilogramme d'eau.

391. **Chaleurs spécifiques.** — On appelle *chaleur spécifique*, ou *ca rifique* d'un corps, la quantité de chaleur qu'il gagne lorsque sa temp lève de zéro à 1 degré, comparativement à celle que gagne, dans le m égal poids d'eau. C'est-à-dire que, de même qu'on a choisi pour unité celle de l'eau, on prend pour unité des chaleurs spécifiques celle du m d'où il résulte que les nombres qui représentent les chaleurs spécifiqu ceux qui représentent les densités, ne sont que des rapports.

On constate facilement que tous les corps n'ont pas la même chale Par exemple, si l'on mélange 1 kilogramme de mercure à 100 degrés gramme d'eau à zéro, on observe que la température du mélange est 3 degrés environ. C'est-à-dire que le mercure s'étant refroidi de 1 quantité de chaleur qu'il a perdue n'échauffe que de 3 degrés le

passe au travers; puis, après lui, le cuivre. L'étain troue le gâteau, mais verser; enfin le plomb et le bismuth n'en atteignent pas même la demi- D'où l'on conclut que, quoique de même poids et à la même tempéra- alle de fer contient plus de chaleur que la balle de cuivre, celle-ci plus le d'étain; et ainsi de suite.

éthodes ont été employées pour la détermination des chaleurs spéci- méthode de la fusion de la glace, celle des mélanges, et celle du refroi- Dans cette dernière, on calcule la chaleur spécifique d'un corps d'après

Fig. 315.

'il met à se refroidir d'un nombre de degrés connu. Nous n'exposerons x premières méthodes; mais, auparavant, il importe de faire con- nent on mesure la quantité de chaleur gagnée par un corps dont le chaleur spécifique sont donnés, lorsque sa température s'élève d'un bre de degrés.

ure de la chaleur sensible absorbée par les corps. — Soient m n corps en kilogrammes, c sa chaleur spécifique et t sa température. de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré un kilogramme été prise pour unité, il faut m de ces unités pour élever de zéro à poids d'eau de m kilogrammes; et pour élever ce dernier poids de rés, il faut t fois plus, c'est-à-dire mt. Puisque telle est la quantité de ssaire pour porter de zéro à t degrés m kilogrammes d'eau, dont la ifique est 1, pour un corps de même poids, dont la chaleur spécifique c fois mt, ou mtc. Donc, lorsqu'un corps s'échauffe de zéro à t de- *ntité de chaleur qu'il absorbe peut se représenter par le produit obtenu mt son poids par le nombre de degrés dont il s'échauffe et par sa cha- ue.*

s s'échauffe ou se refroidit de t à t' degrés, la chaleur absorbée ou de même représentée par la formule

$$m(t'-t)c, \quad \text{ou} \quad m(t-t')c.$$

mmandons ces formules à l'attention des élèves; c'est avec elles qu'on es problèmes sur les chaleurs spécifiques.

ode des mélanges, calorimètre à eau. — Pour calculer, par la

méthode des mélanges, due à Black, la chaleur spécifique d'un corps le pèse et on le porte à une température connue, qu'on détermine tenant un certain temps dans un courant de vapeur à 100 degrés, plonge dans une masse d'eau froide dont le poids et la température ment connus. De la quantité de chaleur que le corps cède à l'eau on d sa chaleur spécifique.

L'appareil dont on fait usage pour cette expérience est un *calorim* Il se compose d'un vase de laiton ou d'argent, à parois minces et tenu par des fils de soie (fig. 316), afin d'éviter la déperdition de la conductibilité. Ce vase est rempli d'eau dans laquelle plonge un th une baguette de verre *a* sert à agiter le liquide pendant qu'il s'éch

Cela posé, représentons par M le poids du corps, par T sa temp moment où on le plonge dans le liquide, et par *c* sa chaleur spécif

De même, soient *m* le poids de l'eau froide et *t* sa température.

Enfin, soient m' le poids du vase qui contient l'eau, c' sa chaleu et *t* sa température, laquelle est évidemment celle de l'eau.

Dès que le corps chaud est plongé dans l'eau, la température de lève, et si l'on représente par θ la plus haute température qu'elle voit que le corps s'est refroidi d'un nombre de degrés représenté par (qu'il a, par conséquent, perdu une chaleur qui a pour mesure $Mc(T-$ et le vase, au contraire, se sont éch nombre de degrés égal à $(\theta - t)$, et respectivement des quantités de chal $m(\theta - t)$ et à $m'c'(\theta - t)$, puisqu spécifique de l'eau est l'unité. Or la chaleur cédée par le corps chaud ment égale à la somme des quantité absorbées par l'eau et par le vase; l'équation

Fig. 316.

$$Mc(T-\theta) = m(\theta - t) + m'c'(\theta$$

de laquelle il est facile de tirer la v lorsque la chaleur spécifique c' du v nue; si elle ne l'était pas, on devra cer par la déterminer en plongeant un corps chaud de même matière q et ayant, par conséquent, la même chaleur spécifique. L'équation prend alors la forme $Mc'(T-\theta) = m(\theta - t) + m'c'(\theta - t)$ [2] et en la résolvant par rapport à c', qui est maintenant la seule inconnu

$$c' = \frac{m(\theta - t)}{M(T-\theta) - m'(\theta - t)}$$

La chaleur spécifique du vase étant connue, pour résoudre l'é trouvée plus haut, on met dans le second membre $(\theta - t)$ en facte il vient alors $Mc(T-\theta) = (m + m'c')(\theta - t)$ [3]. Divisant les de

par $M(T-\theta)$, on a $c = \frac{(m + m'c')(\theta - t)}{M(T-\theta)}$ [4].

On écrit souvent la valeur de *c* sous la forme : $c = \frac{(m + \mu)(\theta}{M(T-}$

posant $m'c' = \mu$; μ est donc le poids d'eau qui prendrait la même chaleur que le vase, ce qu'on exprime en disant que celui-ci est *r*

Afin d'avoir égard aux pertes de chaleur dues au rayonnement da que nous venons de décrire, on fait d'abord une expérience avec le

on cherche la chaleur spécifique, dans le seul but de connaître approximanent le nombre de degrés dont la température de l'eau et du vase doit s'éleu-dessus de la température ambiante. Ce nombre étant, par exemple, 10 degrés, sfroidit l'eau et le vase de moitié, c'est-à-dire de 5 degrés au-dessous de la temture de l'air ambiant; puis on procède à l'expérience définitive. La température eau s'élevant encore sensiblement de 10 degrés, il en résulte que le vase, la température était d'abord de 5 degrés au-dessous de celle de l'enceinte, est, fin de l'expérience, de 5 degrés au-dessus. Il y a donc compensation entre la et le gain de chaleur qui proviennent du rayonnement pendant l'expérience. nfin, pour donner à la méthode des mélanges toute la précision qu'elle com-, on doit tenir compte de la chaleur absorbée par le thermomètre.

4. Appareil de M. Regnault pour la méthode des mélanges. — La figure représente l'appareil qu'a adopté M. Regnault pour la méthode des mélanges.

pièce principale de cet appareil est une étuve AA, représentée en coupe dans re 318. Elle se compose de trois compartiments concentriques : dans le coment central est suspendu, par des fils de soie, un petit panier *c* de fil de laiest dans ce panier qu'est placée, en fragments, la substance sur laquelle on xpérimenter. Un thermomètre T, fixé au centre même de ces fragments, en la température. Dans le second compartiment *pp* circule un courant de qui arrive, par un tube *e*, d'un générateur B, et se rend ensuite par un

tube a, dans un serpentin où la vapeur se condense. Le troisième compartim est rempli d'air destiné à s'opposer à la déperdition de la chaleur. Au-dess l'étuve est une chambre K, entourée d'une double paroi EE, formant un rés qu'on maintient rempli d'eau froide, afin de s'opposer à la transmission de l leur provenant de l'étuve et du générateur. Enfin, le compartiment central tuve est fermé par un registre r qu'on ouvre à volonté, et qui permet al faire passer le panier c de l'étuve dans la chambre K.

A gauche de l'étuve, on voit un petit vase de laiton D (fig. 317), à très-minces, lequel est suspendu, par des fils de soie, sur un petit chariot fait avancer ou reculer à volonté dans la chambre K. Ce vase, qui est d à servir de calorimètre, est rempli d'eau, et dans cette eau plonge un th mètre t qui en donne la température. Enfin, un thermomètre t', placé p appareils, donne la température de l'air ambiant.

Lorsque le thermomètre T indique que la substance placée dans le pani pris une température stationnaire, ce qui a lieu au bout de deux heures et à trois heures, on soulève l'écran h, et l'on fait avancer le vase D juste sous du compartiment central de l'étuve. Tirant alors le registre r, on laiss ber rapidement, dans l'eau du vase D, le panier c et les matières qu'il co sauf le thermomètre T, qui reste fixé à un bouchon. Retirant aussitôt le char le vase D, on agite l'eau de celui-ci jusqu'à ce que le thermomètre t devienn tionnaire. La température qu'il indique alors est celle représentée par θ d formule du paragraphe précédent. Cette température connue, le reste du s'opère comme ci-dessus. Toutefois on tient compte de la chaleur cédée lorimètre par le panier de laiton, et de celle qui est cédée au milieu am

395. **Méthode de la fusion de la glace.** — La méthode que nous allons d

Fig. 319 (h = 80).

Fig. 320.

est fondée sur la chaleur latente absorbée par la glace qui se fond, quant chaleur qui, ainsi qu'on le verra bientôt (401), est de 79 unités pour 1 kilog de glace. L'appareil employé dans cette méthode est dû à Lavoisier et à La et se désigne sous le nom de *calorimètre de glace*. La figure 319 le représo extérieurement, et la figure 320 en donne une coupe verticale. Cet appa formé de trois enveloppes concentriques de fer-blanc. Dans celle du ce place le corps M, dont on cherche la chaleur spécifique; les deux autres c timents sont remplis de glace pilée. La glace du compartiment A est d

paraître P fois 79. D'un autre côté, cette quantité de chaleur est néces-
égale à celle qui a été perdue par le corps M pendant qu'il s'est refroidi
ès à zéro, c'est-à-dire à mtc (392).

$$\text{On a donc } mtc = 79\,P; \text{ d'où } c = \frac{79\,P}{mt}.$$

thode du calorimètre de glace offre plusieurs causes d'erreur. La princi-
u'une partie de l'eau provenant de la fusion reste adhérente à la glace qui
té fondue; le poids P ne peut donc être évalué exactement. De plus
rieur qui pénètre dans le calo-
ar les robinets augmente la
de glace fondue. On remédie
à ces inconvénients en faisant
mme Black, du *puits de glace*.
e ainsi un trou qu'on pratique
morceau de glace compacte, au
'un fer chaud, et dans lequel
le corps dont on cherche la
pécifique, après l'avoir chauffé
mpérature connue (fig. 321).
avance dressé les bords du trou
er chaud, on le recouvre d'un
de glace aussi dressé avec
manière qu'il ferme exacte-

Fig. 321.

rsqu'on juge que le corps est refroidi jusqu'à zéro, on le retire ainsi que
fusion, et le poids de celle-ci étant déterminé, il ne reste plus qu'à le
r dans la formule ci-dessus.

haleurs spécifiques des liquides. — Les chaleurs spécifiques des li-
déterminent également par la méthode du refroidissement, par celle
nges ou par celle du calorimètre de Lavoisier et de Laplace. Seule-
ns cette dernière méthode, ils doivent être renfermés dans un vase ou
tubes de verre qui se placent dans le compartiment M (fig. 320).
nparant entre eux les nombres du tableau ci-après, on voit que l'eau

Nous donnons ici les nombres qu'il a obtenus par la première méthod corps employés le plus fréquemment dans les arts.

SUBSTANCES	CHALEURS SPÉCIFIQUES	SUBSTANCES	CH SPÉ
Eau	1,0080.	Cobalt	(
Essence de térébenthine.	0,42590	Zinc	(
Noir animal calciné	0,36085	Cuivre	(
Charbon de bois calciné.	0,24111	Laiton	(
Soufre	0,20259	Argent	(
Graphite	0,20187	Étain	(
Verre des thermomètres.	0,19768	Iode	(
Phosphore	0,18870	Antimoine	(
Diamant	0,14687	Mercure	(
Fonte blanche	0,12983	Or	(
Acier doux	0,1175.	Platine laminé	(
Fer	0,11379	Plomb	(
Nickel	0,10863	Bismuth	(

Les nombres compris dans cette table représentent les chaleurs moyennes entre zéro et 100 degrés; il résulte, en effet, des travaux de Petit sur la chaleur, que les chaleurs spécifiques augmentent avec l ture; celles des métaux, par exemple, sont plus grandes entre 100 et qu'entre zéro et 100 degrés, et plus grandes encore de 200 à 300 degrés. que, pour élever la température d'un corps de 200 à 300 degrés, il faut p leur que pour l'élever de 100 à 200 degrés, et, dans ce dernier cas, plu l'élever de zéro à 100 degrés.

En un mot, l'augmentation des chaleurs spécifiques avec la température tant plus sensible, que les corps sont plus près de leur point de fusion. Au toute action qui augmente la densité d'un corps et son agrégation diminue sa chaleur spécifique.

Les chaleurs spécifiques des liquides augmentent avec la température plus rapidement que celles des solides. L'eau cependant fait exception, spécifique augmentant beaucoup moins que celles des autres liquides

Enfin, une même substance possède, à l'état liquide, une plus gra spécifique qu'à l'état solide; par exemple, la chaleur spécifique de la g moitié de celle de l'eau. A l'état gazeux, la chaleur spécifique est qu'à l'état liquide.

398. **Loi de Dulong et Petit sur les chaleurs spécifiques des** En 1819, Dulong et Petit firent connaître cette loi remarquable, que de la chaleur spécifique des corps simples par leur poids atomique e pour tous les corps et égal à 37; c'est-à-dire que, *pour les corps s chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.*

M. Regnault, après avoir déterminé avec beaucoup de soin les cha fiques d'un grand nombre de corps, a trouvé que le produit du poids at la chaleur spécifique n'est pas rigoureusement constant, comme l'avale Dulong et Petit, mais que ce produit varie entre 38 et 42, variati résulter de ce que les chaleurs spécifiques ne sont pas déterminées à d égales du point de fusion des corps.

M. Regnault a été conduit, en outre, aux deux lois suivantes s leurs spécifiques des corps composés et des alliages:

les corps composés ayant même formule atomique, la chaleur spécifique en inverse du poids atomique.
des températures un peu éloignées du point de fusion, la chaleur spéci-lliages est exactement la moyenne des chaleurs spécifiques des métaux
t.

haleurs spécifiques des gaz. — On rapporte la chaleur spécifique à celle de l'eau ou à celle de l'air : dans le premier cas, elle repré-antité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré un poids donné de ratively à celle qui serait nécessaire au même poids d'eau ; dans le quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré un volume donné parativement à celle qu'il faudrait pour le même volume d'air.
te dernière manière de considérer les chaleurs spécifiques des gaz, on ntre, supposer ceux-ci à *pression constante* et à volume variable ; ou *me constant*, sous une pression variable.
eurs spécifiques des gaz par rapport à l'eau ont été déterminées, en 1812, he et Bérard. Pour cela, on mesurait la quantité de chaleur cédée à un d'eau par un poids aussi connu de gaz qui circulait dans un serpentin le liquide. On en déduisait ensuite la chaleur spécifique du gaz à l'aide analogue à celui qui a été donné pour la méthode des mélanges.
es physiciens ont déterminé les chaleurs spécifiques des gaz, à pression par rapport à l'air, en comparant entre elles les quantités de chaleur même poids d'eau par des volumes égaux de gaz et d'air, à la même et à la même pression pendant toute l'expérience.
s travaux de Delaroche et Bérard, de la Rive et Marcet, en 1835, é la méthode du refroidissement à la même détermination.
s chaleurs spécifiques des gaz, à volume constant, toujours par rap-, ont été calculées par Dulong, en s'appuyant sur la formule qui fait a vitesse de propagation du son dans les différents gaz (210).
es calculs de Laplace et de Poisson, et les expériences de Clément et de Delaroche et Bérard, de Gay-Lussac et de Dulong, on avait ad-l que la chaleur spécifique des gaz à pression constante est toujours qu'à volume constant. Mais, dans un travail récent et par une mé-rement nouvelle, M. Regnault a trouvé que la différence entre ces deux chaleurs spécifiques est nulle ou extrêmement petite.
e et Bérard ont donné sur les chaleurs spécifiques des gaz la pre-ivante, et Dulong la seconde :
me égal, tous les gaz simples ont des chaleurs spécifiques égales.
ux deux gaz simples se combinent sans condensation, le gaz résultant volume égal, la même chaleur spécifique que les gaz simples composants.
riences de M. Regnault ont fait voir que la première loi n'est rigou-pour les gaz soumis à la loi de Mariotte, c'est-à-dire éloignés de leur quéfaction. Les mêmes expériences n'ont pas confirmé la seconde loi.

Chaleurs spécifiques des gaz simples par rapport à l'eau.

GAZ	A VOLUME ÉGAL	A POIDS ÉGAL
. . . . .	0,24049	0,21751
ne	0,23590	0,40900
. . . . .	0,23680	0,24380
. . . . .	0,29645	0,12099

400. Mesure de la chaleur latente de fusion. — Sachant (382) que, lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, il y a disparition d'une quantité de chaleur plus ou moins considérable, on appelle *chaleur de fusion d'un corps solide le nombre de calories* (390) *nécessaire à 1 kilogramme de ce corps pour passer, sans élévation de température, de l'état solide à l'état liquide.* La chaleur de fusion des corps se détermine par la méthode des mélanges en s'appuyant sur ce principe, que, lorsqu'un corps à l'état liquide se solidifie, il restitue une quantité de chaleur rigoureusement égale à celle qu'il avait absorbée pendant la fusion.

Soit proposé, par exemple, de déterminer la chaleur de fusion du plomb. On fond un poids M de ce corps, et, après en avoir pris la température T, on le verse dans une masse d'eau dont on connaît le poids m et la température t. Cela posé, représentons par c la chaleur spécifique du plomb, par x sa chaleur de fusion, c'est-à-dire la quantité de chaleur consommée par l'unité de poids pour se fondre, ou, ce qui est la même chose, celle qui reparaît au moment de la solidification; enfin soit θ la température finale que prend l'eau échauffée par le plomb.

La masse d'eau s'étant échauffée de t à θ degrés, elle a consommé une quantité de chaleur représentée par $m(\theta - t)$ (392); d'un autre côté, la masse de plomb, en se refroidissant de T à θ, a cédé, d'une part, une quantité de chaleur $Mc(T - \theta)$; de l'autre, au moment de la solidification, elle dégage une quantité de chaleur représentée par Mx. On a donc l'équation :

$$Mc(T - \theta) + Mx = m(\theta - t), \text{ d'où } x = \frac{m(\theta - t) - Mc(T - \theta)}{M}.$$

401. Chaleur de fusion de la glace. — La chaleur de fusion de la glace est celle dont la connaissance présente le plus d'intérêt par les applications qu'on peut en faire. Elle se détermine encore par la méthode des mélanges. Pour cela, soient M un poids de glace à zéro, et m un poids d'eau chaude à t degrés, suffisant pour fondre toute la glace. On projette celle-ci dans l'eau, et aussitôt que la fusion est complète, on mesure la température finale du mélange. Si on la représente par θ, l'eau s'étant refroidie de t degrés à θ a cédé une quantité de chaleur égale à $m(t - \theta)$. Quant à la glace, si l'on représente par x sa chaleur de fusion, elle consomme, pour se fondre, une quantité de chaleur Mx; mais en outre, après la fusion, l'eau qui en provient s'échauffe, et sa température s'élève de zéro à θ degrés; elle prend donc alors une quantité de chaleur $M\theta$. Donc, en définitive, on a l'équation $Mx + M\theta = m(t - \theta)$, d'où on tire la valeur de x.

Par ce procédé, et en évitant avec le plus grand soin toutes les causes d'erreur, de la Provostaye et M. Desains ont trouvé que la chaleur de fusion de la glace est, c'est-à-dire que 1 kilogramme de glace qui se fond, consomme la quantité de chaleur nécessaire pour élever 79 kilogrammes d'eau de zéro à 1 degré, ou, ce qui est la même chose, 1 kilogramme d'eau de zéro à 79 degrés.

Person, qui a fait de nombreuses recherches sur les chaleurs de fusion, a trouvé expérimentalement les nombres suivants pour les chaleurs de fusion de plusieurs corps simples et composés :

Glace	79,25	Bismuth	12,[illegible]
Azotate de soude	62,97	Soufre	9,[illegible]
Zinc	28,13	Plomb	5,[illegible]
Argent	21,07	Phosphore	5,[illegible]
Étain	14,25	Alliage de Darcet	4,[illegible]
Cadmium	13,66	Mercure	2,[illegible]

402. Mesure de la chaleur de vaporisation. — On a vu (363) que les liquides, en se vaporisant, font disparaître une quantité de chaleur très-considérable, qu'on désigne sous le nom de *chaleur d'élasticité* ou de *chaleur de vaporisation*. Pour déterminer la *chaleur de vaporisation* d'un liquide, c'est-à-dire le *nombre de calories qu'absorbe 1 kilogramme de ce liquide pour se vaporiser*.

tation de température, on admet comme évident qu'une vapeur qui se , rend libre une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'elle sorbée en se formant.

posé, la méthode qu'on emploie est la même que pour la détermination leurs spécifiques des gaz par rapport à celle de l'eau. La figure 322 re- l'appareil employé dans ce genre de recherches par Despretz. La vapeur se

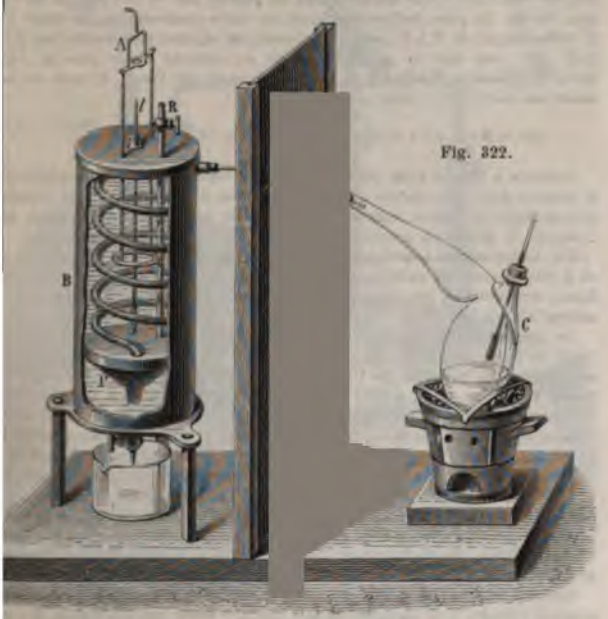


Fig. 322.

dans une cornue C, où sa température est indiquée par un thermomètre, et dans un serpentin plongé dans de l'eau froide. Là elle se condense et cède au n et à l'eau du vase B sa chaleur latente. L'eau qui résulte de la condensa- vend dans un récipient P, auquel aboutit le serpentin, et dont on l'extrait, de l'expérience, pour la peser, son poids étant celui de la vapeur qui a cir- s l'appareil. Un agitateur A, qu'on fait marcher avec la main, sert à r les couches d'eau dans le vase B, pour que toute la masse soit à la même ture. Celle-ci est donnée par un thermomètre *I* placé dans l'axe du serpen- n, du récipient P part un tube terminé par un robinet R. Lorsqu'on veut rier la pression, et, par suite, la température de la vapeur, on met ce en communication par un tube de caoutchouc avec une machine pneu- ou avec une pompe de compression.

tails connus, pour déterminer la chaleur de vaporisation du liquide qui la cornue, on le chauffe d'abord jusqu'à l'ébullition, et c'est alors seu- u'on fait communiquer la cornue avec le serpentin ; puis c'est après avoir communication qu'on recueille l'eau qui s'est condensée dans le réci- et qu'on la pèse.

Soient alors M le poids de la vapeur condensée, T sa température à son entrée dans le serpentin, et x sa chaleur de vaporisation. Soient de même m le poids de l'eau dans laquelle plonge le serpentin, y compris celui du vase B, du serpentin, du thermomètre et de l'agitateur réduits en eau (393), t la température initiale de l'eau, et θ sa température finale quand on arrête l'expérience.

La chaleur cédée par 1 kilogramme de vapeur qui se condense étant x, la chaleur cédée par les M kilogrammes de vapeur par le fait seul de la condensation est Mx. De plus, indépendamment de toute condensation, le poids d'eau M, se refroidissant de T à θ, perd une quantité de chaleur représentée par $M(T-\theta)$; d'où l'on voit que la quantité totale de chaleur cédée par la vapeur est $Mx+M(T-\theta)$. D'ailleurs la chaleur gagnée par l'eau, le vase et les accessoires est $m(\theta-t)$; donc on a

$$Mx+M(T-\theta)=m(\theta-t), \text{ d'où } x=\frac{m(\theta-t)-M(T-\theta)}{M}.$$

Despretz a trouvé ainsi pour la chaleur d'élasticité de la vapeur d'eau, à 100°, le nombre 540; c'est-à-dire que 1 kilogramme d'eau à 100 degrés dépense, pour se vaporiser, la chaleur nécessaire pour élever 540 kilogrammes d'eau de zéro à 1 degré. M. Regnault a trouvé 537, et M. Fabre et Silbermann, 535,8.

403. Calorimètre à mercure de Fabre et Silbermann. — On doit à M. Fabre et à Silbermann un calorimètre très-sensible pour mesurer les capacités calorifiques des liquides, les chaleurs de vaporisation, et la chaleur dégagée dans les actions chimiques.

La figure 323 représente cet appareil. La pièce principale est un réservoir sphérique de fonte A, qui est plein de mercure et en contient 24 kilogrammes, ce qui représente une capacité de 1lit,76. A ce réservoir sont adaptées plusieurs tubulures. A gauche de la figure sont d'abord deux tubulures B, auxquelles sont fixés deux moufles de fonte qui se prolongent dans l'intérieur de la boule. Dans chaque moufle est une éprouvette de verre où se place la substance sur laquelle on expérimente. Un seul moufle et une seule éprouvette suffisent dans la plupart des expériences; les deux moufles sont utilisés quand on veut comparer les quantités de chaleurs dégagées ou absorbées dans deux réactions différentes. A la troisième tubulure C correspond encore un moufle et une éprouvette. Cette tubulure, qui est verticale, est destinée à la détermination des capacités calorifiques avec l'appareil de M. Regnault (394), et elle se place alors au-dessous du registre r de la figure 317.

Quant à la tubulure d, elle renferme un piston plongeur d'acier dont on va voir ci-après l'usage. Une tige, qu'on fait tourner avec une manivelle m, et qui est garnie d'un pas de vis, transmet son mouvement au piston dans le sens de la verticale; mais, par un mécanisme particulier, elle ne lui communique pas son mouvement de rotation. Enfin, la dernière tubulure à droite porte une boule de verre a, à laquelle est soudé un long tube capillaire de verre bo, partagé en parties d'égale capacité.

D'après cette description, on voit que le calorimètre à mercure n'est autre chose qu'un thermomètre à très-gros réservoir et à tige très-capillaire, et par conséquent très-sensible. Toutefois le tube bo ne marque pas les températures du mercure qui est dans le réservoir, mais les calories qui lui sont cédées par les substances qui sont dans les moufles.

Pour effectuer cette graduation, on expérimente de la manière suivante. On commence par faire marcher le piston plongeur d dans un sens ou dans l'autre afin de refouler ou d'aspirer le mercure jusqu'à ce qu'il s'arrête, dans le tube, au point d'où doit partir la graduation; puis ayant versé dans le moufle qu'on a choisi une quantité de mercure qui ne devra plus varier, on y introduit une petite éprouvette de verre mince e (fig. 324), laquelle est maintenue fixe contre la poussée du mercure par un petit taquet extérieur qui n'est pas représenté dans

essin. L'éprouvette ainsi disposée, on y introduit la pointe d'une pipette à boule, ontenant de l'eau distillée qu'on chauffe jusqu'à la température d'ébullition : stournant alors la pipette de la position n à la position n', on laisse écouler une artie du liquide dans l'éprouvette.

La chaleur cédée par le liquide au mercure du réservoir A le faisant se dilater,

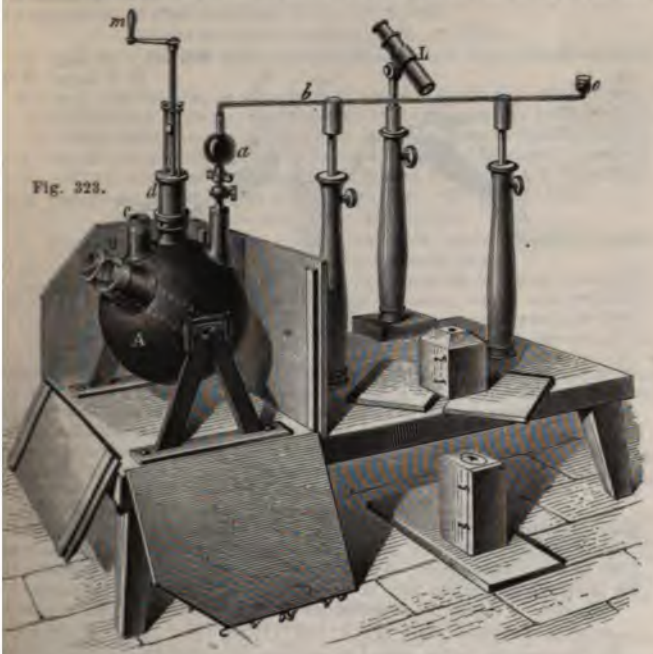


Fig. 323.

colonne de mercure, dans le tube bo (fig. 323), s'allonge d'un nombre de divisions n. Or si l'on pèse l'eau versée dans l'éprouvette, et si l'on prend sa temérature finale au moment où la colonne de mercure devient stationnaire dans tube bo, le produit du poids de l'eau en kilogrammes par le nombre de degrés dont l'eau s'est refroidie, fait connaître le nombre de calories cédées par eau à tout l'appareil. Divisant par n ce nombre de calories, le quotient donne nombre α de calories correspondant à une seule division du tube bo.

Le nombre α une fois connu, pour l'appliquer à la recherche des chaleurs spéiques des liquides, on porte à une température T un poids M du liquide dont on erche la capacité calorifique c, puis on le verse dans l'éprouvette C. Représenant par θ la température finale du liquide, et par n le nombre de divisions dont avancé la colonne mercurielle bo, on a

$$Mc(T-\theta)=n\alpha, \text{ d'où } c=\frac{n\alpha}{M(T-\theta)}.$$

On expérimenterait de même pour les chaleurs de vaporisation.

Les planchettes représentées autour du réservoir A sont à charnière lèvent de manière à former une caisse qu'on remplit de duvet de cyg ouate, pour éviter toute déperdition de chaleur. On achève de clore avec les planchettes représentées sur la droite et avec deux petits étai

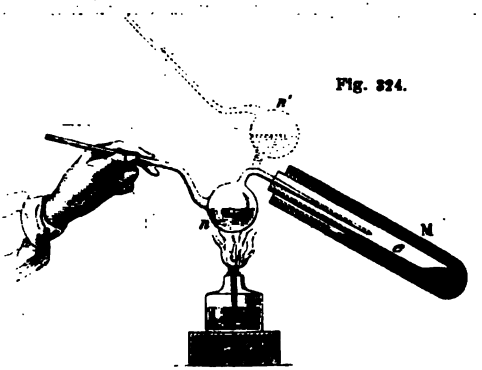


Fig. 324.

qui se placent sur les tubulures *d* et *a*. Enfin une lunette L, dont le pied ser le long de la table, sert à lire les déplacements du mercure sur le

404. **Problèmes sur les chaleurs spécifiques et sur les chaleurs** — I. Dans un vase de verre pesant 12 grammes et contenant $0^{kil},15$ d'eau grés, on projette un morceau de fer dont le poids est 20 grammes et la ture 98 degrés; la température de l'eau montant alors à $11^{\circ},29$, on de chaleur spécifique du fer, sachant que celle du verre est 0,19768.

Ce problème se résout au moyen de la formule [4] du paragraphe 393, plaçant les lettres M, m, m', c', t et θ, par les nombres qui leur correspon l'énoncé ci-dessus. Quant au poids de l'eau, on l'obtient en observant c d'eau pesant 1 kilogramme, $0^{kil},15$, ou, ce qui est la même chose, 0^{kil} 150 grammes, abstraction faite de la dilatation de l'eau de 4 à 10 de

Cela posé, en faisant les substitutions dans la formule indiquée, il

$$20(98-11,29)c=(150+12\times 0,19768)(11,29-10), \quad \text{d'où} \quad c=$$

II. Une masse de platine, pesant 40 grammes, est placée dans un four assez longtemps pour en prendre la température; en étant ensuite retiré gée dans une masse d'eau dont le poids est de 84 grammes et la temp 12 degrés, on observe que l'eau s'échauffe jusqu'à 22 degrés. On deman pérature du four, sachant que la chaleur spécifique du platine est 0,

Si l'on représente par t la température cherchée, le nombre d'unit leur cédées par le platine, en se refroidissant de t degrés à 22, est $40\times$ $\times 0,03243$, d'après la formule $m(t'-t)c$ (392). De même, le nombre d chaleur absorbées par l'eau, dont la chaleur spécifique est 1, pour s'éc 12 degrés à 22, est $84(22-12)$ ou 840. Or la quantité de chaleur ab l'eau étant nécessairement la même que celle qui est perdue par le plat

$$40\times(t-22)\times 0,03243=840; \quad \text{d'où} \quad t=669,5 \text{ degrés.}$$

Il est à observer que cette valeur de t n'est qu'approximative, car 0,03243 est la chaleur spécifique du platine entre zéro et 100 degrés; ma qu'à une température plus élevée elle est plus grande (397); par cons nombre 669,5 est trop fort.

III. Ayant pratiqué une cavité dans un morceau de glace, on y en

e d'étain qui pèse 55 grammes, et dont la température a été portée préalaement à 100 degrés. Quel sera le poids de glace fondu, sachant que la chaleur fique de l'étain est 0,05623, et que la chaleur de fusion de la glace est 79? 'étain, se refroidissant ici de 100 jusqu'à zéro, perd un nombre d'unités haleur représenté par $55 \times 100 \times 0,05623$, toujours d'après la formule *mtc*. Or logramme de glace à zéro absorbant, pour se fondre, 79 unités de chaleur, logrammes de glace absorbent $79 \times x$. On a donc

$$79x = 55 \times 100 \times 0,05623; \quad \text{d'où} \quad x = 3^{kr},9.$$

V. Quel est le poids de glace à projeter dans 9 litres d'eau pour les refroidir 20 degrés à 5?

ait M le poids cherché, en kilogrammes; ce poids absorbera, pour se fondre, nombre d'unités de chaleur représenté par 79 M (401); mais le poids d'eau M, i en résulte, étant à zéro au moment de la fusion, et devant s'échauffer de 5 de-s, absorbe une quantité de chaleur 5 M; par conséquent, la chaleur totale ab-bée est 79 M + 5 M, ou 84 M. Quant à la chaleur cédée par les 9 litres d'eau, se refroidissant de 20 degrés à 5, elle est 9 (20 — 5), ou 135. Donc

$$84\,M = 135; \quad \text{d'où} \quad M = 1^{kil},607.$$

V. Quel est le poids de vapeur d'eau, à 100 degrés, nécessaire pour échauffer, se condensant, 208 litres d'eau de 14 degrés jusqu'à 32?

ait p ce poids en kilogrammes; la chaleur latente de la vapeur d'eau étant (402), p kilogrammes de vapeur, en se condensant, cèdent une quantité de leur représentée par $540 \times p$, et fournissent p kilogrammes d'eau à 100 degrés. ette eau, en se refroidissant ensuite jusqu'à 32 degrés, cède elle-même une ntité de chaleur égale à $p(100 - 32)$, ou $68p$. D'ailleurs, les 208 litres qui s'é-uffant de 14 degrés à 32, pesant 208 kilogrammes, toujours abstraction faite la dilatation, absorbent une quantité de chaleur égale à $208(32 - 14)$ ou 3744 ités; on a donc

$$540p + 68p = 3744; \quad \text{d'où} \quad p = 6^{kil},158.$$

VI. Dans un premier vase, on a de l'eau à 11 degrés; dans un second, de l'eau 91; combien doit-on prendre de kilogrammes d'eau dans chacun d'eux pour for-r un bain de 250 kilogrammes à 31 degrés?

oient x et y les nombres de kilogrammes à prendre respectivement dans chaque , on a d'abord $x + y = 250$ [1]. On obtient une deuxième équation en x et en y, observant que x kilogrammes à 11 degrés contiennent $11x$ unités de chaleur, ns y kilogrammes à 91 degrés en contiennent un nombre représenté par $91y$. Mours, les 250 kilogrammes de mélange, à 31 degrés, renferment 250×31, 7750 unités; on a donc l'équation $11x + 91y = 7750$ [2].

es équations [1] et [2] étant résolues, on trouve $x = 187^{kil},5$, et $y = 62^{kil},5$.

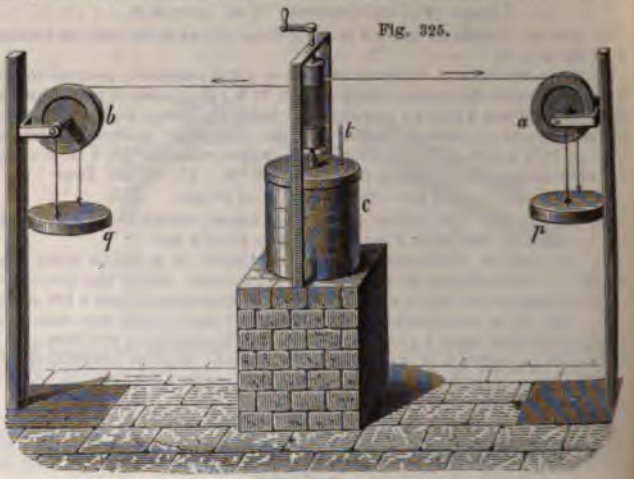
ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

Expériences de M. Joule. — Après avoir fait connaître les quantités haleur nécessaires à l'échauffement des corps et à leurs changements d'état, i est le lieu de dire comment on a mesuré la quantité de chaleur à dépenser r produire un travail mécanique déterminé (270). On sait, en effet, que la ur peut produire du travail mécanique, comme il arrive dans l'expansion apeurs et dans la dilatation des gaz; et, réciproquement, qu'on peut dé-ser de la chaleur par un travail mécanique, par exemple, par la percus-, la pression, le frottement. Or les savants à qui est due la théorie dyna-e de la chaleur (271) ne se sont pas bornés à montrer que la chaleur peut nsformer en travail; ils ont encore constaté qu'à toute quantité de cha-disparue correspond une quantité déterminée de travail effectué, et, réci-ement, que pour tout travail consommé il y a une certaine quantité de ur qui apparaît; en un mot, qu'entre la chaleur et le travail il y a rap-

port constant, ou *équivalence*. De là, on a nommé *équivalent mécanique* de la chaleur le travail que peut produire l'unité de chaleur (390); ou, ce qui revient au même, le travail nécessaire pour échauffer 1 kilogramme d'eau de zéro à 1 degré.

Le docteur Mayer, le premier, en 1842, a calculé par des considérations théoriques l'équivalent mécanique de la chaleur; et M. Joule, en 1843, l'a déterminé par l'expérience. Ce savant a fait usage d'un calorimètre à eau dans lequel

Fig. 325.



tournait un arbre vertical muni de palettes (fig. 325). La rotation s'opérait par deux cordons enroulés dans le même sens sur un treuil fixé à l'arbre des palettes, mais se déroulant suivant deux tangentes diamétralement opposées. Ces cordons se rendaient sur deux poulies a et b, entraînées en sens contraires par deux poids égaux p et q.

En représentant par P la somme des poids p et q mesurés en kilogrammes, par h la hauteur de chute mesurée en mètres, le travail développé pendant la descente était Ph kilogrammètres (37). Le travail consommé par la résistance de l'eau au mouvement des palettes se transformant alors en chaleur, le liquide s'échauffait d'une quantité mesurée par un thermomètre qui plongeait dans le calorimètre. Connaissant le poids de celui-ci, le poids de l'eau et le nombre de degrés dont elle s'était échauffée, on calculait la quantité totale de chaleur produite par la formule mtc (390); et le quotient $\frac{Ph}{mtc}$ donnait le travail correspondant à une seule unité, c'est-à-dire l'équivalent mécanique de la chaleur.

Toutefois, dans cette expérience, tout le travail n'étant pas transmis à l'eau, mais une partie étant consommée à vaincre les frottements, ou perdue dans le choc du poids contre le sol à la fin de sa chute, on a dû tenir compte de ces causes d'erreur. C'est en expérimentant ainsi, et en prenant la moyenne d'un grand nombre d'expériences, que M. Joule a trouvé, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, 424 kilogrammètres. C'est-à-dire que la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'eau développe une force motrice capable d'élever un poids de 424 kilogrammes à un mètre de hauteur en une se-

que celle qu'elle avait reçue du foyer pour se former. Or les expériences Hirn ont fait voir qu'il n'en est pas ainsi : la chaleur cédée au conden- t beaucoup moindre que celle enlevée à la chaudière, et d'autant moindre, travail mécanique total effectué par la machine est plus considérable. dire que la chaleur que possède la vapeur à sa sortie de la chaudière se en deux parties : l'une qui disparaît comme chaleur et se transforme ail, l'autre qui se rend au condenseur. L'expérience fait voir que la pre- 'est que le cinquième de la seconde.

machines à air chaud d'Ericsson et autres conduisent au même résultat transformation de la chaleur en travail; mais leur rendement est beau- us considérable, car la théorie fait voir qu'elles peuvent convertir en la moitié de la chaleur dépensée.

t à la chaleur animale due à la combustion du carbone du sang dans mons, le docteur Mayer annonça, le premier, que tout animal est une e à feu qui transforme cette même chaleur en travail, ce que M. Hirn mé par l'expérience. A cet effet, ce savant a enfermé un homme dans une close et observé les effets calorifiques et chimiques de sa respiration, d'a- rsque l'homme était au repos pendant un certain temps, puis lorsqu'il ait à élever son propre poids sur la circonférence d'une roue mobile. Deux e caoutchouc aboutissaient à la bouche du sujet, l'un lui amenant, d'un tre jaugé, l'air nécessaire à la respiration, et l'autre conduisant l'air à un second gazomètre aussi jaugé; ce qui permettait de mesurer l'oxy- nsommé et l'acide carbonique produit.

mpérature de l'air dans la guérite s'élevait progressivement, et devenait te lorsque la chaleur perdue par le rayonnement égalait celle produite rganisme. On remplaçait ensuite le sujet par la flamme d'un bec de gaz égalait de manière à amener l'air, dans la guérite, à la même tempéra- En tenant compte du volume de gaz brûlé, on avait la quantité duite par le bec de gaz, et par suite, par l'homme, dans un

lui-ci consommait 30 grammes d'oxygène par heure pour 150 ns; lorsqu'il s'élevait sur la roue, il consommait 150 grammes

DÉCOMPOSITION PAR LA CHALEUR SEULE

* 407. **Dissociation.** — On a vu (272) que la chaleur produit sur les corps, outre leur échauffement, trois effets : dilatation, changement d'état et décomposition. Après avoir décrit les deux premiers, il nous reste à faire connaître le troisième, mais seulement d'une manière succincte, car il est plus du domaine de la chimie que de la physique.

La chaleur seule suffit pour décomposer partiellement ou en totalité un grand nombre de composés : les azotates, la plupart des carbonates, certains oxydes, les matières organiques. Or, de même que chaque solide a sa température de fusion propre, et chaque liquide sa température d'ébullition, l'expérience fait voir que chaque substance a aussi une température déterminée de décomposition totale. Pour l'eau, par exemple, cette température est de 2 800 degrés. Cependant ce même liquide, placé dans des conditions convenables, se décompose partiellement à la température beaucoup moins élevée de 1 000 à 1 200 degrés. C'est ce qui arrive lorsqu'on fait passer un courant de vapeur d'eau dans un tube de porcelaine renfermant une capsule pleine d'argent fondu : l'eau est en partie décomposée, et son oxygène étant absorbé par l'argent, l'hydrogène se dégage avec l'excès de vapeur.

M. H. Sainte-Claire Deville a donné le nom de *dissociation* à ce phénomène de décomposition partielle par la chaleur à une température inférieure à celle de la décomposition totale. Ce savant, qui a étudié avec soin le phénomène de la dissociation, l'explique en le comparant à celui de l'évaporation des liquides, laquelle a lieu à des températures bien inférieures à celle de leur ébullition. C'est-à-dire que de même qu'il y a une température d'ébullition fixe pour chaque liquide, il y aurait pour chaque substance une température déterminée de décomposition complète; mais de même encore que la vaporisation commence à une température inférieure à celle de l'ébullition, les corps seraient partiellement décomposés à une température plus basse que celle de la décomposition totale.

Pour qu'il y ait dissociation, les gaz qui deviennent libres doivent se trouver dans des conditions qui ne leur permettent pas de se combiner de nouveau. C'est ce qui a lieu dans la décomposition de l'eau par l'argent fondu : tout l'oxygène étant absorbé, l'hydrogène se trouve libre et se dégage.

De même, la vapeur d'eau ne donne aucune trace de décomposition lorsqu'elle passe dans un tube de platine chauffé à une température voisine de celle de la fusion de ce métal; mais à une température beaucoup moindre, dans un tube de porcelaine non vernissée, la vapeur est décomposée parce que son hydrogène peut filtrer à travers les parois du tube (168). D'où l'on doit conclure que, dans le tube de platine ci-dessus, il y a probablement dissociation; mais les deux gaz, restant en présence à une température très-élevée, se recombinent au fur et à mesure.

CHAPITRE VIII

CONDUCTIBILITÉ DES SOLIDES, DES LIQUIDES ET DES GAZ

408. **Conductibilité des solides.** — La *conductibilité* est la propriété que possèdent les corps de transmettre la chaleur plus ou moins facilement dans l'intérieur de leur masse. Ce genre de propagation s'opère par une communication de mouvement intérieure de molécule à molécule. Tous les corps ne conduisant pas également la chaleur, on appelle *bons conducteurs* ceux qui la trans-

acilement : tels sont surtout les métaux ; et l'on donne
e *mauvais conducteurs* à ceux qui offrent une plus ou
ande résistance à la propagation de la chaleur : tels sont
le verre, les résines, et surtout les liquides et les gaz.
mparer le pouvoir conducteur des solides, Ingenhousz,
hollandais, mort à la fin du siècle dernier, construisit le
areil qui porte son nom
. C'est une caisse de fer-
de laiton, à laquelle sont
l'aide de tubulures et de
, des baguettes de diverses
s, de fer, de cuivre, de
erre. Ces baguettes péné-
quelques millimètres dans
de la caisse, et sont re-
de cire jaune, qui fond
s. La caisse étant remplie

Fig. 326 ($l=22$).

illante, on remarque que sur les baguettes métalliques
re bientôt en fusion à une plus ou moins grande distance,
sur les autres on n'observe aucune trace de fusion. Or
conducteur est évidemment d'autant plus grand, que la
laquelle la cire a été fondue s'étend plus loin.

Fig. 327.

a comparé les pouvoirs conducteurs des solides au
ne barre prismatique dans laquelle sont, de décimètre
tre, de petites cavités remplies de mercure, dans cha-
uelles plonge un thermomètre (fig. 327). Cette barre
sée par un bout à une source de chaleur constante, on

voit les thermomètres monter successivement à partir de la source, puis indiquer des températures fixes, décroissantes d'un thermomètre au suivant. Par ce procédé, Despretz a vérifié la loi suivante, due à Lambert : *Les distances à la source croissent en progression arithmétique, les excès de température sur l'air ambiant décroissent en progression géométrique.*

Toutefois cette loi ne se vérifie que pour les métaux très-bons conducteurs, tels que l'or, le platine, l'argent et le cuivre; elle n'est qu'approchée pour le fer, le zinc, le plomb, l'étain, et nullement applicable aux corps non métalliques, comme le marbre, la porcelaine, etc.

En représentant par 1000 le pouvoir conducteur de l'or, Despretz a trouvé que celui des substances suivantes est :

Platine	981	Étain	304
Argent	973	Plomb	179
Cuivre	897	Marbre	23
Fer	374	Porcelaine	12
Zinc	363	Terre de brique	11

Afin de ne pas altérer la forme des barres métalliques en y pratiquant des cavités comme l'avait fait Despretz, ce qui détruisait partiellement la continuité des métaux, Wiedmann et Franz, en 1853, ont employé un procédé à l'abri de cette cause d'erreur. Ils ont mesuré la température des barres, en leurs différentes parties, par les courants thermo-électriques qu'ils obtenaient en appliquant sur ces parties le point de soudure d'un élément de la pile thermo-électrique (299).

Les barres métalliques étaient aussi régulières que possible, et disposées dans un espace dont la température était constante. Une des extrémités des barres était en communication avec une source de chaleur, et l'élément thermo-électrique qui devait être mis en contact avec les barres avait de très-petites dimensions afin de ne leur enlever que très-peu de chaleur.

En opérant ainsi, Wiedmann et Franz ont obtenu des résultats notablement différents de ceux de Despretz. En représentant par 100 la conductibilité de l'argent, ils ont trouvé :

Argent	100	Acier	11,8
Cuivre	77,6	Plomb	8,8
Or	53,2	Platine	8,4
Étain	14,5	Alliage de Rose	2,8
Fer	11,9	Bismuth	1,[illegible]

Les substances organiques, comme le son, la paille, la laine, le coton, conduisent mal la chaleur; quant aux bois, M. de la Rive, à Genève, a fait voir que leur conductibilité est beau

s grande dans le sens des fibres que transversalement, et que bois les plus denses sont les meilleurs conducteurs.

09. **Conductibilité des liquides.** — La conductibilité des liqui- est extrêmement faible, le mercure seul, qui est un métal, ant exception. Elle est même tellement faible, que Rumford nettait qu'elle était nulle. Cependant Murray fit voir qu'en uffant la couche supérieure d'un liquide, les couches infé- ures s'échauffaient, même dans un vase de glace à zéro, dont parois ne pouvaient s'échauffer sans se fondre.

Fig. 328.

Despretz, ayant repris cette expérience, trouva que non-seule- nt les liquides conduisent la chaleur, mais que leur conducti- ité est soumise à la loi de Lambert (408). Son appareil consis- t en un tonneau de 1m,50 de hauteur, rempli d'eau et fermé à sa tie supérieure par un vase de cuivre A (fig. 328). Le long d'une me douve du tonneau sont percés des trous dans lesquels sont s des thermomètres. Un courant d'eau à 100 degrés arrive len- ent dans le vase A par un tuyau C, et s'en écoule par un second au D. Le vase étant maintenu ainsi à une température con- te, la couche d'eau en contact avec lui s'échauffe, puis la che inférieure, et ainsi successivement des couches suivantes, u'indiquent les thermomètres. Or, la température étant sta- naire depuis longtemps, et l'expérience ayant été prolongée dant 36 heures, Despretz a trouvé que la chaleur se propage

dans les liquides suivant la même loi que dans les barres métalliques, mais la conductibilité est incomparablement plus faible.

410. **Mode d'échauffement des liquides.** — Lorsqu'on chauffe les liquides par leur partie inférieure, il résulte de leur faible conductibilité que c'est par des courants ascendants et descendants, qui s'établissent dans leur masse, que l'échauffement se produit. Ces courants s'expliquent par la dilatation des couches inférieures, qui, devenues moins denses, s'élèvent et sont remplacées par les couches supérieures plus froides, et, par suite, plus denses. On rend ces courants visibles en projetant dans l'eau de la sciure de bois, qui monte et descend avec eux (fig. 329).

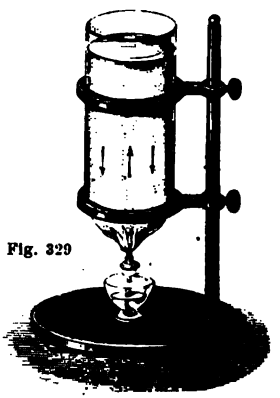


Fig. 329

411. **Conductibilité des gaz.** — On ne peut apprécier directement la conductibilité des gaz, à cause de leur grand pouvoir diathermane (...) et de l'extrême mobilité de leurs molécules; mais lorsqu'ils sont gênés dans leurs mouvements, leur conductibilité paraît à peu près nulle. On remarque, en effet, que toutes les substances entre les filaments desquelles de l'air reste stationnaire offrent une grande résistance à la propagation de la chaleur : telles sont la paille, le coton, l'édredon, les fourrures. Quand une masse gazeuse s'échauffe, c'est surtout par son contact avec un corps chaud et par les courants ascendants qui proviennent de la dilatation, de la même manière que dans les liquides.

412. **Conductibilité de l'hydrogène.** — Magnus a cherché la conductibilité propre de chaque gaz, au moyen d'un tube de verre fermé par un robinet et disposé verticalement. Au bas du tube, à l'intérieur, était un thermomètre qu'on observait à travers le verre, tandis que l'extrémité supérieure était maintenue à ... degrés. En expérimentant avec ce tube successivement vide, puis rempli de différents gaz plus ou moins condensés, Magnus a obtenu les résultats suivants :

1° La température du thermomètre s'élève plus dans l'hydrogène que dans tous les autres gaz.

2° Elle est plus élevée dans l'hydrogène que dans le vide, et d'autant plus, que ce gaz est plus condensé.

3° Dans les autres gaz, la température est moins élevée que dans le vide, et d'autant moins, que les gaz sont plus condensés

ıs anglais lui ont donné le nom de *convection*, ıifie *transporter*. En effet, la convection, dans ns les gaz, est le transport des molécules des ers les parties froides.

ıÉTÉOROLOGIE, une application importante de la 'ormation des courants atmosphériques et des

ı de la conductibilité. — La plus ou moins ilité des corps rencontre de nombreuses appli-, par exemple, de conserver un liquide long-ı l'enferme dans un vase à double enveloppe ıst rempli de matières non conductrices : sciure ilé, charbon pulvérisé, paille. On emploie le ır empêcher un corps d'absorber la chaleur : ır conserver de la glace dans la saison chaude, ille ou d'une couverture de laine.

tations, si les carreaux nous paraissent plus quet, c'est qu'ils conduisent mieux la chaleur. haleur ou de froid que nous ressentons au con-rps est due à la conductibilité. Si leur tempéra-ıvée que la nôtre, ils nous paraissent plus froids cause de la chaleur qu'ils nous enlèvent en vertu ilité : c'est ce qui a lieu pour le marbre. Si, au mpérature est supérieure à celle de notre corps, : plus chauds qu'ils ne sont, par la chaleur qu'ils

CHAPITRE IX

RAYONNEMENT, RÉFLEXION ET ABSORPTION DE LA CHALEUR

415. **Rayonnement ou radiation.** — Lorsqu'un corps est placé dans une enceinte dont la température est plus ou moins élevée que la sienne, on observe toujours que la température du corps s'élève ou s'abaisse progressivement, jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'enceinte; d'où l'on conclut que le corps a gagné ou perdu une certaine quantité de chaleur qu'il a reçue des corps voisins ou qu'il leur a cédée. La chaleur se transmet donc d'un corps à un autre, à travers l'espace, de la même manière que la lumière. Cette propagation de la chaleur, qui se produit à toutes les distances et dans toutes les directions, se désigne sous le nom de *rayonnement*, ou sous celui de *radiation;* et l'on nomme *absorption* l'inverse de la radiation, c'est-à-dire la pénétration de la chaleur rayonnante dans les corps. Enfin, on appelle *rayon de chaleur, rayon calorifique*, toute ligne droite suivant laquelle la chaleur se propage, et *faisceau* un ensemble de rayons. Si ceux-ci s'écartent les uns des autres, le faisceau est *divergent;* s'ils sont parallèles, le faisceau lui-même est dit *parallèle.*

Il ne faudrait pas croire qu'il n'y a que les corps que nous désignons vulgairement sous le nom de *corps chauds*, qui émettent de la chaleur, et que les *corps froids*, qui en absorbent. Tous les corps, chauds ou froids, émettent et absorbent constamment de la chaleur, seulement en quantités inégales.

Dans la théorie dynamique de la chaleur, le rayonnement est une communication à l'éther du mouvement vibratoire des molécules de la matière, et lorsqu'un corps se refroidit, c'est parce que ses molécules perdent une partie de leur mouvement, qu'elles cèdent à l'éther. Une fois engendrées, les ondes de l'éther vont choquer les molécules des corps qu'elles rencontrent, lesquels s'échauffent à leur tour; en sorte que c'est par un échange continuel de mouvement que se produisent tous les phénomènes d'échauffement et de refroidissement; et nous-mêmes, c'est purement en notre qualité de récipients ou de cessionnaires de ce mouvement que nous devenons conscients de la chaleur et du froid.

Dans l'étude de la chaleur rayonnante, il y a lieu de distinguer la chaleur *obscure* et la chaleur *lumineuse:* la première étant celle émise par un corps non lumineux, comme un vase rempli d'eau à 100 degrés, et la seconde, celle émise par un corps lumineux,

e le soleil, une masse métallique chauffée au rouge. On en effet, que la chaleur obscure et la chaleur lumineuse nt par quelques-unes de leurs propriétés (434 et 440).

Lois du rayonnement. — Le rayonnement de la chaleur ite les trois lois suivantes :

e rayonnement a lieu dans toutes les directions autour rps. En effet, si l'on place un thermomètre dans différentes ions autour d'un corps chaud, il indique, dans toutes, une ion de température.

ans un milieu homogène, le rayonnement se fait en ligne . Car, si l'on interpose un écran sur la droite qui joint une calorifique à un thermomètre, celui-ci cesse d'être in- é par la source.

e en passant d'un milieu dans un autre, de l'air dans le par exemple, les rayons calorifiques, de même que les lumineux, changent de direction, phénomène qu'on dé- ous le nom de *réfraction*, et dont on verra les lois en opti- es lois étant les mêmes pour la lumière et pour la chaleur.

a chaleur se propage dans le vide. On a d'abord admis que sence d'un milieu pondérable était nécessaire ponnement de la chaleur. Or la propagation de leur lumineuse dans le vide se trouve démon- r celle que nous envoie le soleil à travers les s planétaires, lesquels ne contiennent aucune e pondérable. Quant à la propagation de la r obscure dans le vide, on la constate par rience suivante, due à Rumford. Ayant soudé, paroi d'un ballon de verre d'un demi-litre de té, un thermomètre dont le réservoir occupe re (fig. 330), on soude au col du ballon un long barométrique, puis on remplit le ballon et le le mercure sec; retournant ensuite l'appareil, ge le bout ouvert dans une cuvette pleine de re, exactement comme dans l'expérience de elli (fig. 105). Le mercure s'abaissant à la hauteur moyenne centimètres, le vide se fait dans le ballon et dans une du tube. Chauffant alors celui-ci à la lampe, au-dessus du du mercure, jusqu'à la fusion du verre, la pression exté- déprime les parois du tube, qui se soudent et ferment her- ement le ballon. Or, ce dernier étant ainsi complétement d'air, dès qu'on l'expose à une source de chaleur, qu'on le , par exemple, dans de l'eau chaude, on voit le thermomètre presque instantanément; donc la chaleur obscure se pro-

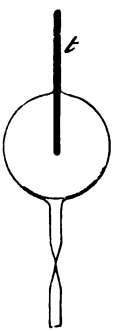


Fig. 330.

page dans le vide, car le verre est trop mauvais conducteur pour que la propagation s'opère aussi rapidement par les parois du ballon et la tige du thermomètre.

Quant à la vitesse de propagation de la chaleur, elle n'a pas été déterminée : on sait seulement qu'elle doit peu différer de celle de la lumière, si elle ne lui est pas rigoureusement égale; car la lumière solaire et la plupart des lumières artificielles sont constamment accompagnées de rayons de chaleur.

417. Intensité de la chaleur rayonnante, causes qui la font varier. — On prend pour *intensité* de la chaleur rayonnante *la quantité de chaleur reçue sur l'unité de surface dans l'unité de temps*. Trois causes modifient cette intensité suivant les lois données ci-après : la distance de la source de chaleur, l'obliquité des rayons calorifiques par rapport à la surface qui les émet, et leur obliquité par rapport à la surface qui les reçoit.

1re Loi. — *L'intensité de la chaleur rayonnante est en raison inverse du carré de la distance.* Cette loi peut se démontrer par le raisonnement et par l'expérience. En effet, soit d'abord une sphère creuse *ab* (fig. 331), d'un rayon quelconque, et à son centre une source de chaleur constante C. Chaque unité de surface de la paroi intérieure reçoit une quantité déterminée de chaleur. Or si l'on suppose que le rayon de la sphère soit doublé et devienne C*f*, sa surface, d'après un théorème connu de géométrie, sera quadruplée. La paroi intérieure contiendra donc quatre fois plus d'unités de surface, et comme la quantité de chaleur émise du centre reste la même, chaque unité en recevra nécessairement quatre fois moins.

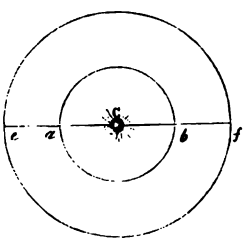


Fig. 331.

Pour démontrer la même loi expérimentalement, on prend une caisse de fer-blanc M remplie d'eau chaude, et dont la face supérieure est recouverte de noir de fumée (fig. 332); puis l'on exposé en avant de cette face l'appareil thermo-électrique de Melloni (299). La pile est munie de son réflecteur conique, et la paroi interne de celui-ci est recouverte de noir de fumée pour empêcher toute réflexion intérieure (429). La face de la pile étant d'abord placée à une distance *co* de 20 centimètres, l'aiguille du galvanomètre est écartée et s'arrête, par exemple, à 80 degrés.

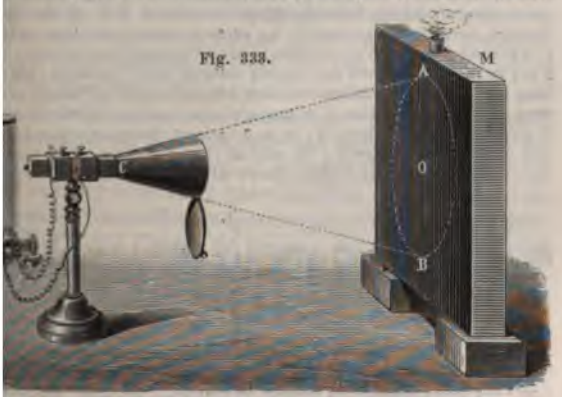
Or, si l'on recule la pile à une distance CO double de *co* (fig. 33 le galvanomètre conserve la même déviation 80, ce qui montre que la pile reçoit toujours la même quantité de chaleur. Il en est

même si on la porte à une distance trois, quatre fois de. Ce résultat semble d'abord contradictoire à la loi t de démontrer, mais au contraire il la confirme. En effet,

Fig. 332.

emière position, la pile ne reçoit de chaleur que de la rculaire *ab* de la paroi de la caisse, tandis que, dans la 'est la portion circulaire AB qui rayonne vers elle. Les

Fig. 333.



ACB et *acb* étant semblables, et la hauteur du premier le de la hauteur du second, le diamètre AB est lui- ble de *ab*, et, par suite, la surface AB quadruple de la , puisqu'on sait que la surface du cercle est proportion- rré de son rayon. Donc, puisque, la surface rayonnante

de la caisse croissant comme le carré de la distance, le g mètre reste stationnaire, il faut que l'intensité de la chale par la pile soit en raison inverse du même carré.

Il importe d'observer que cette loi ne s'applique qu'aux calorifiques divergents; pour des rayons parallèles, l'inte la même à toutes les distances, sauf l'absorption par les que la chaleur traverse.

2me Loi. — *L'intensité des rayons calorifiques émis obliquement par u rayonnante est proportionnelle au cosinus de l'angle que font ces rayo normale à la même surface.* Pour démontrer cette loi, soient, en proje zontale, P la pile de Melloni en communication avec son galvanomètre

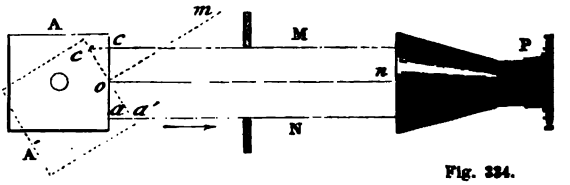
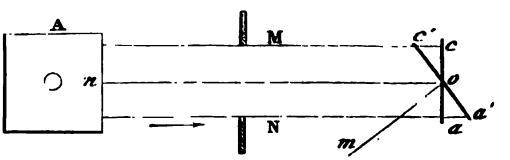


Fig. 334.

fils conducteurs, et A un cube de fer-blanc rempli d'eau chaude (fig. 334 étant d'abord dans la position A, telle que sa paroi antérieure soit perpe au faisceau parallèle MN qui tombe sur la pile, le galvanomètre marqu taine déviation, 45 degrés, par exemple, le rayonnement étant dû alor tion *ac* de la paroi du cube. Si l'on tourne celui-ci dans une positio que sa paroi antérieure devienne oblique au faisceau MN, on observe qu nomètre continue à marquer 45. La surface rayonnante étant actuell plus grande que *ac*, si l'on représente par *i* l'intensité des rayons perpe à *ac*, et par *i'* l'intensité des rayons obliques à *a'c'*, puisque l'effet es dans les deux cas, ces intensités sont nécessairement en raison invers faces *ac* et *a'c'*; on a donc $i' \times$ surf. $a'c' = i \times$ surf. ac [1]. Or, la surfac la projection de la surface *a'c'*, on a, d'après un théorème connu de trig surf. $ac =$ surf. $a'c'$ cos coc'; ou surf. $ac =$ surf. $a'c'$ cos mon, puisque mon et coc' sont égaux comme ayant les côtés perpendiculaires; port

Fig. 335.



leur de surface *ac* dans l'égalité [1], et supprimant le facteur commu $i' = i$ cos mon, égalité qui montre la loi.

Cette loi, connue sous le nom de *loi du cosinus*, n'est pas générale de la Provostaye et M. Desains ont constaté qu'elle ne se vérifie que d très-restreint, celui où les corps sont, comme le noir de fumée, dénu voir réflecteur (429).

3me Loi. — *L'intensité des rayons calorifiques qui tombent obliquem surface est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons im la normale à la surface.* Cette loi se démontre de la même manière qu

ıettant rien vers le premier; cela, jusqu'à ce que
corps le plus chaud, baissant graduellement,
elle de l'autre corps, et alors tout rayonnement
èse a été remplacée par la suivante, due à Pré-
D'après ce savant, tous les corps, quelle que
ıre, émettent constamment de la chaleur dans
ıs. Alors il y a perte, c'est-à-dire refroidisse-
ɔnt la température est la plus élevée, parce que
mettent sont d'une plus grande intensité que
nt. Au contraire, il y a gain, c'est-à-dire échauf-
: dont la température est la moins élevée. Il
nent où la température est la même de part et
s il y a encore échange de chaleur entre les
chacun reçoit autant qu'il émet; c'est pourquoi
ste constante. C'est cet état particulier qu'on
ɔm d'*équilibre mobile de température.*

ton sur le refroidissement.— Un corps, dans le
dit ou ne s'échauffe que par rayonnement ou
ns l'atmosphère, il se refroidit ou s'échauffe en
act avec l'air. Dans les deux cas, la vitesse de
d'échauffement est *la quantité de chaleur per-*
dans l'unité de temps; elle est d'autant plus
fférence de température est plus considérable.
le dans les gaz que dans le vide, et varie avec
Elle est plus grande, par exemple, dans l'hy-

20 à 30 degrés. Au delà, la quantité de chaleur perdue (bée est plus grande que la loi ne l'indique.

420. **Conséquences de la loi de Newton.** — 1° Lorsqu'un exposé à une source de chaleur constante, sa température rait s'élever indéfiniment; car la quantité de chaleur qu en temps égaux est toujours la même, tandis que celle q croît avec l'excès de sa température sur celle de l'air ar vient donc un moment où la quantité de chaleur émise é qui est absorbée, et la température reste alors stationn

2° La loi de Newton, appliquée au thermomètre dif fait voir que ses indications sont proportionnelles aux de chaleur qu'il reçoit. Soit, en effet, un thermomètre tiel dont l'une des boules reçoit les rayons émis par u constante : l'instrument indique d'abord des température santes, puis devient bientôt stationnaire. A ce moment tité de chaleur que reçoit la boule égale celle qu'elle p cette dernière, d'après la loi de Newton, est proporti l'excès de la température de la boule sur celle de l'enceint à-dire au nombre de degrés marqué par le thermomèt *ce nombre de degrés est proportionnel à la quantité d que reçoit l'instrument.*

RÉFLEXION, ÉMISSION ET ABSORPTION DE LA CHAL

421. **Lois de la réflexion.** — Lorsque des rayons calorifi bent sur la surface d'un cor partagent généralement en (ties : les uns pénètrent dans du corps, les autres se relève repoussés par la surface, nière d'une bille élastique; exprime en disant qu'ils sont

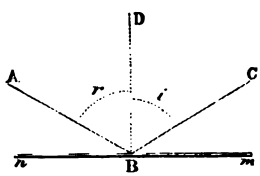
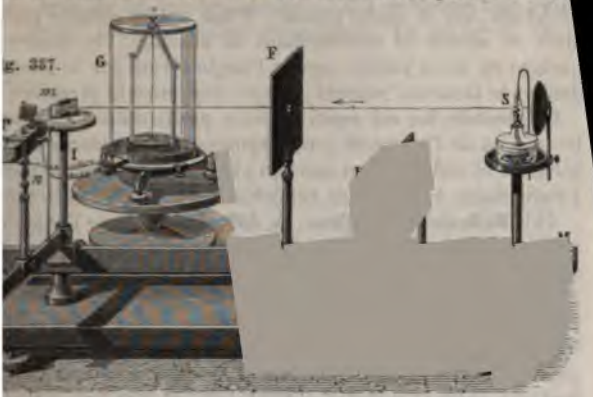


Fig. 336.

Si l'on représente par *mn* une surface plane réfléchissante, par CB le *rayon inci* BD une ligne perpendiculaire à la surface, qu'on no *male*, par BA le *rayon réfléchi*, l'angle CBD est dit l'*a*

Melloni, ou au moyen des miroirs concaves (425). La
7 montre comment se fait l'expérience avec l'appareil
. Sur une règle horizontale MN, d'un mètre de longue
se en millimètres, sont fixées différentes pièces à l'aid



le pression. En S est une source de chaleur consistant
ube de laiton plein d'eau à 100 degrés, ou en un fil de
hauffé à blanc dans la flamme d'une lampe à alcool. En K,
plein intercepte, quand il est relevé, les rayons de cha-
nt de la source; en F, un deuxième écran, percé à son
t destiné à laisser passer un faisceau parallèle. A l'autre
de la règle est une tige I, qui soutient un limbe gradué
ro correspond à la direction de la règle MN, et, par
isceau S*m*. Le limbe est percé à son centre d'un trou
tourne un axe qui porte un miroir métallique plan *m*.
tige I tourne librement une alidade R, sur laquelle
pile thermo-électrique P en communication avec son
e G. Entre la pile et le limbe gradué est une tige *n*,
son extrémité, vers le bord du limbe gradué, pour
celui-ci les déplacements angulaires de l'alidade.
an coudé H, porté par l'alidade, se place entre la
leur et la pile, afin que celle-ci ne reçoive que la
ie par le miroir. Dans le dessin, pour ne pas mas-
écran n'est pas à la place qu'il doit occuper.
onnus, on procède à l'expérience en abaissant d'a-
Un faisceau de chaleur passant aussitôt par le trou
mbe sur le miroir *m* et s'y réfléchit. Si l'alidade
direction du faisceau réfléchi, celui-ci ne ren-

incident et réfléchi sont dans un plan horizontal et, par su
pendiculaire à la surface réfléchissante, qui est verticale

423. **Réflexion irrégulière, ou diffusion.** — Dans l'expéri
précède, où la chaleur se réfléchit sur une surface bien p
a admis que la réflexion ne se produit que dans une seu
tion; c'est la *réflexion régulière*, ou *réflexion spéculai*
chaleur qui tombe sur la surface d'un corps ne se réflé
tout entière suivant les lois de la réflexion régulière (42
partie se réfléchit irrégulièrement, c'est-à-dire dans tout
rections autour du point d'incidence, phénomène qu'on
sous le nom de *réflexion irrégulière*, ou de *diffusion*; e
voir diffusif d'une substance est le rapport de la quant
de chaleur réfléchie dans toutes les directions à la qu
chaleur incidente.

La réflexion régulière se produit sur les surfaces polie
flexion irrégulière, sur les surfaces rugueuses, comme le
dépolies de verre ou de métal.

Le pouvoir diffusif varie avec la source de chaleur e
surface réfléchissante. Avec le noir de fumée, les mét
verre polis, il est très-faible et peut être négligé. Avec le
mats, le verre dépoli, le papier, le blanc de céruse, le
diffusif est plus ou moins grand suivant la source d

La diffusion de la chaleur a été découverte par
moyen du thermo-multiplicateur (299). Pour cela, e
une surface métallique mate ou recouverte de blan

al ou de verre, qui servent à concentrer en un même point ons lumineux ou calorifiques.

ne considèrerons que les miroirs sphériques. La figure 339 nte deux de ces miroirs; la figure 338 en donne une coupe e, qu'on nomme *section principale*. Le centre C de la

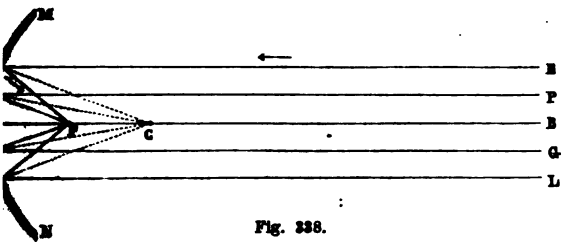


Fig. 338.

à laquelle le miroir appartient est le *centre de courbure;* t A, milieu du réflecteur, le *centre de figure;* et la droite née par ces deux points, l'*axe principal*.

d'appliquer aux miroirs sphériques les lois de la réflexion surfaces planes, on les regarde comme formés d'une infi- surfaces planes infiniment petites, appartenant en chaque n plan tangent correspondant; cette hypothèse permet de re, par la géométrie, que les normales à ces petites surfaces nt toutes concourir au centre de courbure.

l'axe AB du miroir MN, supposons une source de chaleur éloignée pour que les rayons EK, PH..., qui en émanent, nt être considérés comme parallèles entre eux. D'après l'hy- e ci-dessus, que le miroir est formé d'une infinité de petits nts plans, le rayon EK se réfléchit sur l'élément K absolu- comme sur un miroir plan; c'est-à-dire que, CK étant la nor- à cet élément, le rayon prend une direction KF telle, que CKF est égal à l'angle CKE. Les autres rayons PH, GI..., échissant de la même manière, tous ces rayons, après leur ion, vont très-sensiblement concourir en un même point F ur le milieu de AC, ainsi qu'il sera démontré en optique Il y a donc, en F, réunion des rayons calorifiques, et, par ment, une plus grande élévation de température qu'en tout point. De là le nom de *foyer* qu'a reçu ce point. La distance foyer au miroir s'appelle la *distance focale*.

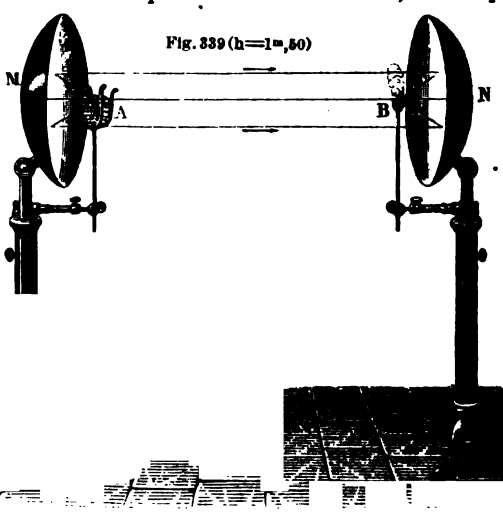
s la figure ci-dessus, la chaleur se propage suivant les li- KF, LDF..., dans le sens des flèches; mais réciproque- si le corps chaud est placé en F, la chaleur se propage t les lignes FKE, FDL..., les rayons émis du foyer deve-

nant, après la réflexion, parallèles entre eux; d'où il résulte que la chaleur transmise tend alors à conserver la même intensité.

425. **Vérification, par les miroirs concaves, des lois de la réflexion.** — L'expérience suivante, faite pour la première fois, à Genève, par Pictet et Saussure, et connue sous le nom d'*expérience des miroirs conjugués*, vérifie non-seulement l'existence des foyers, mais en même temps les lois de la réflexion de la chaleur. Deux réflecteurs M et N (fig. 339) sont disposés à 4 ou 5 mètres de distance, de manière que leurs axes coïncident. Au foyer de l'un, dans un petit panier de fil de fer A, on place des charbons incandescents; au foyer de l'autre, un corps inflammable B, de l'amadou par exemple. Les rayons émis par la source A se réfléchissent une première fois sur le miroir M. Ayant pris, par l'effet de cette réflexion, une direction parallèle à l'axe (424), les rayons viennent se réfléchir une seconde fois sur l'autre réflecteur et concourir en son foyer B. Ce qui le prouve, c'est que le morceau d'amadou placé en ce point prend feu, tandis qu'en deçà et au-delà du foyer il ne s'enflamme pas.

De cette expérience, on conclut que la chaleur se réfléchit suivant les mêmes lois que la lumière. En effet, si l'on place au

Fig. 339 (h=1m,50)



foyer A, où étaient les charbons incandescents, une bougie allumée, et au foyer B un petit écran de verre dépoli ou de papier on observe sur cet écran un foyer lumineux, exactement au m

point où s'enflammait l'amadou. Donc la réflexion a lieu, dans les deux cas, suivant les mêmes lois. Or il sera démontré (487) que, pour la lumière, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence, et que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante; *donc il en est de même pour la chaleur.*

426. **Miroirs ardents.** — C'est en raison de la haute température qu'on peut obtenir aux foyers des miroirs concaves qu'on leur a donné le nom de *miroirs ardents*. On rapporte qu'Archimède embrasa les vaisseaux romains, devant Syracuse, au moyen de semblables miroirs. Buffon a construit des miroirs ardents dont la puissance prouve que le fait attribué à Archimède est possible. Ces miroirs étaient formés d'un grand nombre de glaces planes et étamées, longues de 22 centimètres sur 16 de large. Elles pouvaient être tournées indépendamment l'une de l'autre dans telle ou telle direction, de manière que les rayons réfléchis sur chacune vinssent concourir en un même point. Avec 128 glaces, par un soleil ardent d'été, Buffon enflamma ainsi une planche de bois goudronnée, à 68 mètres de distance.

En recevant les rayons solaires sur un miroir de laiton écroui, de 1 mètre de diamètre et d'un rayon de courbure de 2 mètres, on obtient au foyer une chaleur tellement intense, que la silice, la pierre ponce, le cuivre, l'argent, y fondent en quelques minutes.

Fig. 340.

427. **Réflexion dans le vide.** — La chaleur se réfléchit dans le vide comme dans l'air. Pour le démontrer, on fait l'expérience suivante, due à Davy. Sous le récipient de la machine pneumatique, on dispose deux petits réflecteurs en regard l'un de l'autre (fig. 340). Au foyer de l'un est un thermomètre très-sensible, au foyer de l'autre une source de chaleur électrique consistant en un fil de platine qu'on rend incandescent en y faisant passer le courant d'une pile. Le thermomètre monte aussitôt de plusieurs degrés, phénomène qui est bien dû à la chaleur réfléchie; car le thermomètre n'accuse plus la même élévation de température, si n'est pas exactement au foyer du second réflecteur.

428. **Réflexion apparente du froid.** — Si l'on dispose deux réflecteurs en regard l'un de l'autre (fig. 339), et qu'au lieu de charbons incandescents, on place au foyer du miroir M une masse de glace ou un mélange réfrigérant, l'air ambiant étant à 12 ou 15 degrés, par exemple, un thermomètre différentiel, placé au foyer de l'autre réflecteur, indique un abaissement de température de plusieurs degrés. Ce phénomène semble d'abord résulter de rayons frigorifiques émis par la glace et réfléchis par les miroirs. Mais cette *réflexion apparente du froid*, comme on l'appelle, s'explique par l'équilibre mobile de température qui tend toujours à s'établir entre tous les corps (418). En effet, dans cette expérience, comme dans celle de l'inflammation de l'amadou, le miroir devant lequel est la masse de glace se substitue à une portion de l'enceinte. Par suite, les rayons de chaleur que celle-ci envoie vers le thermomètre sont interceptés par le miroir et remplacés par ceux qui, partis de la glace, tombent sur le premier miroir, s'y réfléchissent vers le second, et de là tombent enfin sur la boule du thermomètre. Or ces rayons ne compensent pas l'effet des rayons interceptés par le miroir, car leur température est plus basse; de là le refroidissement marqué par le thermomètre.

C'est au même effet qu'il faut rapporter le froid qu'on ressent près des murailles de plâtre, de pierre, et de toute masse dont la température est inférieure à celle de notre corps.

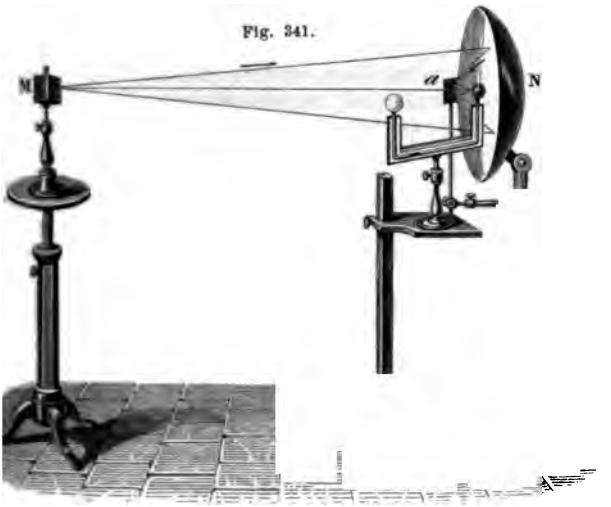
429. **Pouvoir réflecteur.** — Le *pouvoir réflecteur* d'une substance est sa propriété de renvoyer une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente.

On distingue le *pouvoir réflecteur absolu* et le *pouvoir réflecteur relatif*: le premier est le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente; le second est le rapport entre la quantité de chaleur réfléchie par un corps et celle réfléchie par un autre, qui est ordinairement le cuivre jaune poli.

Le pouvoir réflecteur varie d'une substance à une autre. Pour d'étudier ce pouvoir sur diverses substances, sans en construire autant de réflecteurs, Leslie disposa ses expériences comme le montre la figure 341. La source de chaleur est un cube M rempli d'eau à 100 degrés. Sur l'axe d'un réflecteur N, entre le foyer du miroir, est fixée une plaque *a* de la substance dont on cherche le pouvoir réflecteur. Avec cette disposition, les rayons émis par la source et réfléchis une première fois sur le miroir rencontrent la plaque *a*, s'y réfléchissent de nouveau et viennent former un foyer entre la plaque et le miroir, en un point où l'on place la boule d'un thermomètre différentiel. Or, le réflecteur et le thermomètre restant les mêmes, et l'eau du cube étant toujours à 100 degrés

bserve que la température accusée par le thermomètre varie la nature des plaques *a*; d'où l'on déduit, non pas le pouvoir cteur absolu d'un corps, mais le rapport de ce pouvoir à celui autre corps pris pour terme de comparaison. En effet, conément à ce qui a été dit (420, 2°) sur l'application de la loi de

Fig. 341.



ion au thermomètre différentiel, les températures marquées cet instrument sont proportionnelles aux quantités de chaleur l reçoit. Par conséquent, si une plaque de verre et une plaque lomb, par exemple, font marcher le thermomètre différentiel, remière de 1 degré et l'autre de 6, on en conclut que la quande chaleur réfléchie par le plomb est 6 fois plus grande que réfléchie par le verre; car, celle émise par la source étant la e, le miroir N en réfléchit la même portion, et la différence eut dépendre que du pouvoir réflecteur des plaques *a*.

est par ce procédé, et en représentant par 100 le pouvoir réeur du cuivre jaune, pris pour terme de comparaison, que e a formé le tableau suivant des pouvoirs réflecteurs relatifs :

Cuivre jaune poli	100	Encre de Chine	13
Argent	90	Étain amalgamé	10
Étain plané	80	Verre	10
Acier	70	Verre huilé	5
Plomb	60	Noir de fumée	0

Ces nombres représentent les pouvoirs réflecteurs relatifs par rapport au cuivre jaune.

Melloni, le premier, a déterminé, à l'aide du thermo-multiplicateur, le pouvoir réflecteur absolu d'un certain nombre de substances. De la Provostaye et M. Desains, qui l'ont déterminé pour plusieurs métaux, disposaient l'appareil comme il l'est dans la figure 337. Ayant enlevé la plaque *m*, on tournait l'alidade R jusqu'à ce qu'elle fût dans le prolongement de la règle MN. La pile recevant directement la chaleur de la source, l'aiguille du galvanomètre marquait, par exemple, 18 degrés. Mettant alors sur le limbe gradué une plaque *m*, bien polie, du métal dont on cherchait le pouvoir réflecteur, on tournait l'alidade jusqu'à ce que la pile reçût la chaleur réfléchie par la plaque. Or le galvanomètre marquait actuellement une déviation moindre, soit 15 degrés, d'où le pouvoir absolu de la plaque était $\frac{15}{18}$. C'est ainsi que de la Provostaye et M. Desains ont trouvé les pouvoirs absolus suivants, la chaleur étant réfléchie sous un angle de 50 degrés :

Plaqué d'argent	0,97	Acier	0,82
Or	0,95	Zinc	0,81
Laiton et cuivre rouge	0,93	Fer	0,77
Platine	0,83	Fonte de fer	0,74

On verra bientôt (434) quelles sont les causes qui, pour une même substance, font varier le pouvoir réflecteur.

430. **Pouvoir absorbant.** — Le *pouvoir absorbant* des corps est leur propriété de laisser pénétrer dans leur masse une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente. De même que pour les pouvoirs réflecteurs, on distingue les pouvoirs absorbants *absolus* et les pouvoirs absorbants *relatifs*.

M. Tyndall admet que l'absorption dépend du synchronisme qui existe entre les vibrations des atomes d'où émanent les ondulations de l'éther, et entre celles des atomes contre lesquelles ces ondulations viennent se heurter; ce qui explique comment la chaleur est plus absorbée par certains corps que par d'autres.

Le pouvoir absorbant d'un corps est toujours dans un ordre inverse de son pouvoir réflecteur; c'est-à-dire que plus un corps réfléchit la chaleur, moins il l'absorbe, et réciproquement. Mais les deux pouvoirs ne sont pas complémentaires; c'est-à-dire que la somme des quantités de chaleur réfléchie et absorbée ne représente pas la totalité de la chaleur incidente. Elle est toujours moindre; ce qui tient à ce que la chaleur incidente se divise régulièrement en trois parties : 1° une qui est absorbée et échauffe le corps; 2° une autre qui est réfléchie régulièrement, c'est-à-dire suivant les lois démontrées précédemment (421); 3° une troisième

qui est réfléchie irrégulièrement (423). De plus, pour un certain nombre de corps, il y a à considérer une quatrième partie de chaleur, celle qui passe au travers sans les échauffer (436).

Pour déterminer le pouvoir absorbant des corps, Leslie a fait usage de l'appareil déjà employé à la recherche des pouvoirs réflecteurs (fig. 341). Il supprimait la plaque *a* et plaçait la boule du thermomètre différentiel au foyer même du réflecteur. Cette boule étant successivement recouverte de noir de fumée, de vernis, de feuilles d'or, d'argent, de cuivre, etc., le thermomètre, sous l'influence de la source M, indiquait une température d'autant plus élevée, que la substance qui couvrait la boule focale absorbait plus de chaleur. Leslie a constaté ainsi que le pouvoir absorbant d'un corps est d'autant plus grand, que son pouvoir réflecteur est plus faible. Toutefois, dans ces expériences, le rapport des pouvoirs absorbants ne peut se déduire de celui des températures marquées par le thermomètre, car ici la loi de Newton n'est pas rigoureusement applicable (420, 2°), cette loi n'étant vraie que pour des corps de même substance; tandis que l'enveloppe qui recouvre la boule focale varie à chaque observation. Mais on va voir ci-après (432) comment les rapports des pouvoirs absorbants peuvent se déduire des rapports des pouvoirs émissifs.

Melloni a déterminé les pouvoirs absorbants relatifs, au moyen de son thermo-multiplicateur, par la méthode suivante. Il fixait devant la pile des plaques de cuivre minces, dont la face qui regardait la pile était recouverte de noir de fumée, tandis que la face qui recevait les rayons de la source de chaleur était recouverte de la substance dont on cherchait le pouvoir absorbant, par exemple, une couche de noir de fumée, de blanc de céruse, de gomme laque, ou d'une feuille de papier, d'or, d'étain. Ces diverses substances absorbant plus ou moins la chaleur incidente, les plaques de cuivre rayonnaient inégalement vers la pile, et le galvanomètre marquait des déviations différentes. En prenant pour source de chaleur un cube de Leslie rempli d'eau à 100 degrés, et représentant par 100 le pouvoir absorbant du noir de fumée, Melloni a trouvé ainsi les pouvoirs absorbants relatifs ci-après :

Noir de fumée	100	Encre de Chine	85
Blanc de céruse	100	Gomme laque	72
Colle de poisson	91	Métaux	13

431. **Pouvoir émissif.** — Le *pouvoir émissif* ou *rayonnant* des corps est leur propriété d'émettre, à température et à surface égales, une quantité de chaleur plus ou moins grande. On ne considère que des pouvoirs émissifs relatifs.

C'est encore avec l'appareil représenté dans la figure 341 que

Leslie a déterminé le pouvoir émissif des corps. Pour cela, la boule du thermomètre différentiel était placée au foyer même du réflecteur, et les faces du cube M étaient formées de métaux différents, ou recouvertes de diverses substances, comme noir de fumée, papier, etc. Le cube étant plein d'eau à 100 degrés, et les autres conditions restant les mêmes, Leslie tournait successivement vers le réflecteur chaque face du cube, et notait les températures données par le thermomètre. Pour la face recouverte de noir de fumée, la température s'élevait plus que pour toutes les autres, et c'étaient les faces métalliques qui donnaient les plus faibles températures. En appliquant ici la loi de Newton, et en représentant par 100 la chaleur émise par le noir de fumée, Leslie a formé le tableau suivant des pouvoirs émissifs :

Noir de fumée	100	Colle de poisson	[illegible]
Céruse	100	Plomb terne	[illegible]
Papier	98	Mercure	[illegible]
Cire à cacheter	95	Plomb décapé	[illegible]
Verre blanc ordinaire	90	Fer poli	[illegible]
Encre de Chine	88	Étain, or, argent, cuivre	[illegible]

Il est à remarquer que dans ce tableau l'ordre des corps est précisément l'inverse de celui du tableau des pouvoirs réflecteurs.

Melloni a déterminé les pouvoirs émissifs en prenant, comme Leslie, pour source de chaleur un cube plein d'eau à 100 degrés dont une des faces était recouverte de noir de fumée, et les autres de différentes substances. En dirigeant successivement sur la pile les rayons émis par ces différentes faces (fig. 342), et en représentant par 100 le pouvoir émissif du noir de fumée, Melloni a trouvé les pouvoirs émissifs ci-après :

Noir de fumée	100	Encre de Chine	[illegible]
Blanc de céruse	100	Gomme laque	[illegible]
Colle de poisson	91	Surfaces métalliques	[illegible]

De la Provostaye et M. Desains, qui ont repris ces expériences toujours en faisant usage du thermo-multiplicateur, ont trouvé les nombres suivants pour les pouvoirs émissifs des métaux rapportés à celui du noir de fumée représenté par 100 :

Platine laminé	10,80	Or en feuilles	[illegible]
— bruni	9,50	Argent vierge laminé	[illegible]
Argent mat déposé chimiquement	5,36	— pur bruni	[illegible]
Cuivre en lames	4,90	— déposé chimiquement et bruni	[illegible]

D'où l'on conclut que les pouvoirs émissifs donnés par Leslie et par Melloni pour les métaux sont trop grands.

432. **Comparaison des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs.** — De ses expériences sur les pouvoirs absorbants et les p[illegible]

s émissifs des différentes substances comparées au noir de fu-
, Leslie avait conclu que, pour un même corps, le pouvoir
ssif est toujours égal au pouvoir absorbant; c'est-à-dire que si
substance émet deux, trois fois plus de chaleur que le noir
umée, elle en absorbe aussi deux, trois fois davantage.

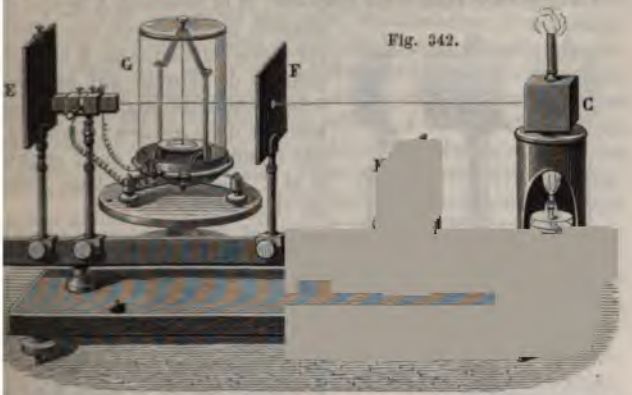


Fig. 342.

Cette loi a été longtemps admise comme générale; mais Kirch-
off ayant trouvé que les pouvoirs émissif et absorbant d'une
ème substance ne varient pas dans le même rapport quand la
mpérature s'élève, ou quand la source de chaleur change, la loi
Leslie est soumise aux deux conditions suivantes :

1° Lorsqu'on compare le pouvoir émissif d'un corps à son pou-
r absorbant, la température doit être sensiblement la même.

2° La chaleur absorbée et la chaleur émise doivent être de même
ure : toutes les deux obscures, ou toutes les deux lumineu-
(415).

es restrictions posées, la loi de Leslie se vérifie par l'expé-
ce suivante, dans laquelle on opère sur des substances dont
ouvoir diffusif est négligeable.

33. **Expérience de Ritchie pour démontrer la proportionnalité
Pouvoirs absorbant et émissif.** — Pour vérifier la loi de Leslie,
hie a adopté un appareil qui n'est autre chose qu'un thermo-
re différentiel, dont les deux boules de verre sont remplacées
deux réservoirs cylindriques B et C, de métal, et pleins d'air
343). Entre eux en est un troisième, A, plus grand, de même
e, et pouvant être rempli d'eau chaude par une tubulure; de
, il est mobile et peut être approché plus ou moins de B ou
. Enfin, les bases de ces trois cylindres, qui sont en regard,

sont alternativement recouvertes d'un plaqué d'argent et de noir de fumée; en sorte que deux faces en présence sont toujours l'une argentée, l'autre noircie. Par suite, la face argentée de A rayonne vers la face noire de B, et la face noire de A vers la face argentée de C.

L'expérience étant ainsi disposée, et le réservoir A rempli d'eau chaude, on remarque que, lorsqu'il est à égale distance de B et de C, la colonne de liquide qui est dans le tube reste stationnaire et à la même hauteur dans les deux branches, ce qui montre que les deux réservoirs B et C absorbent la même quantité de chaleur.

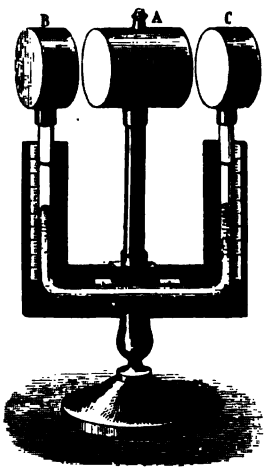


Fig. 343.

Or, si l'on représente par a et e les pouvoirs absorbant et émissif du noir de fumée, par a' et e' ceux de l'argent, la quantité de chaleur absorbée par B, étant en même temps proportionnelle à a et à e, est représentée par le produit $a \times e$; de même la chaleur absorbée par C est représentée par $a' \times e$. On peut donc poser

$$a \times e' = a' \times e, \quad \text{d'où} \quad \frac{a}{a'} = \frac{e}{e'},$$

égalité qui exprime d'une manière générale que *les pouvoirs absorbants sont proportionnels aux pouvoirs émissifs.*

Si l'on prend le pouvoir absorbant du noir de fumée pour unité des pouvoirs absorbants, et son pouvoir émissif pour unité des pouvoirs émissifs, l'égalité ci-dessus donne $a' = e'$; c'est-à-dire qu'alors *les pouvoirs absorbant et émissif sont égaux.*

434. **Causes qui modifient les pouvoirs réflecteur, absorbant et émissif.** — Les pouvoirs émissif et absorbant étant proportionnels, toute cause qui modifie l'un modifie nécessairement l'autre dans le même sens. Quant au pouvoir réflecteur, puisqu'il marche dans un ordre inverse des deux autres, toute cause qui augmente ceux-ci le diminue, et réciproquement.

On a vu que ces différents pouvoirs varient d'une substance à une autre; que ce sont les métaux qui ont le plus grand pouvoir réflecteur, et le noir de fumée le plus faible. Mais, pour un même corps, ces pouvoirs sont encore modifiés par le degré de poli, la densité, par l'épaisseur de la substance rayonnante ou

ssante, par l'état physique de cette substance, par l'obliquité ı rayons incidents ou émis, par la nature de la source de chaır, et enfin par l'espèce de chaleur, obscure ou lumineuse.

Pouvoir réflecteur. — On a longtemps admis que le pouvoir réıteur croissait d'une manière générale avec le degré de poli des rfaces, et que les autres pouvoirs, au contraire, diminuaient. is Melloni a constaté qu'en rayant une plaque métallique polie, ıtôt on diminuait son pouvoir réflecteur, tantôt on l'augmenıt, phénomène que ce physicien a expliqué par le plus ou moins ı densité que prend la plaque. Si celle-ci a d'abord été écrouie, omogénéité a été détruite; les molécules sont plus rapprochées la surface que dans la masse, et le pouvoir réflecteur est augenté. Alors, lorsqu'on raye la surface, la masse intérieure, qui t moins dense, est mise à nu, et le pouvoir réflecteur diminue. a contraire, dans une plaque non écrouie et homogène, le pouır réflecteur est augmenté lorsqu'on la raye avec un instrument nchant, ce qui provient d'une augmentation de densité à la surce, due aux raies qu'on y a tracées.

Le pouvoir réflecteur varie avec l'inclinaison des rayons inciıts. Pour les métaux, cette influence est peu sensible; mais, ur les substances transparentes, la quantité de chaleur réfléchie gmente rapidement avec l'angle d'incidence. Pour le verre, le uvoir réflecteur absolu, qui est 0,05 pour un angle d'incidence 20 degrés, devient 0,55 pour un angle d'incidence de 80.

Le pouvoir réflecteur est encore modifié par la source de chaır: pour l'acier il est 0,60 avec la chaleur solaire, et 0,83 avec haleur émise par une lampe Locatelli (sans verre).

Enfin, le pouvoir réflecteur des métaux est plus grand avec la leur obscure qu'avec la chaleur lumineuse.

Pouvoir émissif. — L'épaisseur des substances modifie leur voir émissif, ainsi que le prouvent les expériences de Leslie, umford et de Melloni. Ce dernier s'est assuré qu'en vernissant faces d'un cube métallique rempli d'eau à une température ante, le pouvoir émissif croissait avec le nombre des couches ernis, jusqu'à 16 couches, et qu'au delà il restait constant, l qu'en fût le nombre. Il a calculé que l'épaisseur des 16 couı était de $\frac{1}{100}$ de millimètre. Quant aux métaux, des feuilles de 8, 4 et 2 millièmes de millimètre ayant été successivet appliquées sur les faces d'un cube de Leslie, en verre, la diution de la chaleur rayonnante fut la même. L'épaisseur de la he rayonnante est donc sans influence pour les métaux, du s dans la limite d'épaisseur qu'on peut leur donner.

Etat physique d'une substance change aussi son pouvoir émis-

sif. Ainsi les corps réduits en poudre impalpable paraissent avoir tous le même pouvoir émissif; c'est du moins ce qu'ont observé Masson et M. Courtépée pour seize corps sur vingt, qu'ils ont soumis à l'expérience. M. Tyndall attribue ce résultat à la gomme arabique qui servait à fixer les poudres. En les appliquant à l'eau, il a trouvé des pouvoirs émissifs différents.

Le pouvoir émissif varie encore avec l'inclinaison des rayons sur la surface qui les émet, sauf pour le noir de fumée, avec lequel il est constant sous toutes les inclinaisons. Avec le blanc de céruse, le pouvoir émissif, étant 100 dans la direction normale, n'est plus que 66 sous une inclinaison de 80 degrés. Dans les mêmes conditions d'obliquité, le pouvoir émissif du verre est successivement 90 et 54.

Enfin, pour un même corps, le pouvoir émissif varie avec la température. Par exemple, le pouvoir émissif du borate de plomb diminue lorsqu'on le porte à une température élevée. A 100 degrés, il est très-approximativement le même que celui du noir de fumée, tandis qu'à 550 degrés il n'en est que les 0,75.

Quant aux corps gazeux en combustion, leur pouvoir rayonnant est extrêmement faible, comme on le constate en approchant la pile thermo-électrique d'une flamme d'hydrogène, quoique la température de cette flamme soit très-élevée. Mais si l'on place dans la flamme une spirale de platine, cette spirale, prenant la température de la flamme, rayonne fortement. C'est par un effet semblable que les flammes des lampes et du gaz d'éclairage rayonnent beaucoup plus que la flamme d'hydrogène, à cause de l'excès de carbone qu'elles contiennent, et qui, n'étant pas brûlé en totalité, devient incandescent dans la flamme.

Pouvoir absorbant. — Melloni a constaté que le pouvoir absorbant varie avec la nature de la source de chaleur. Par exemple, pour une même quantité de chaleur incidente, le carbonate de plomb en absorbe à peu près deux fois plus, si elle est émise par un cube plein d'eau à 100 degrés, que si elle l'est par une lame. Le noir de fumée seul absorbe toujours la même quantité de chaleur, quelle qu'en soit la source.

Le pouvoir absorbant varie encore avec l'inclinaison des rayons incidents. Il est à son maximum à l'incidence normale, et diminue à mesure que les rayons incidents s'écartent de la normale. C'est une des raisons pour lesquelles le sol s'échauffe plus l'été que l'hiver; car, l'été, les rayons solaires sont moins obliques.

En général, toutes les causes qui modifient le pouvoir émissif modifient dans le même sens le pouvoir absorbant.

435. **Applications.** — La propriété que possèdent les corps de

ber, de réfléchir ou d'émettre plus ou moins facilement la chaleur, présente de nombreuses applications dans l'économie domestique et dans les arts. Par exemple, avec les vases dans lesquels on fait chauffer des liquides, tels que les cafetières, il y a avantage à ce que leur surface soit noire et dépolie, puisque alors le pouvoir absorbant est plus grand. L'éclat qu'on est dans l'habitude de leur donner est acheté aux dépens du combustible. S'il s'agit, au contraire, de conserver un liquide chaud le plus longtemps possible, il faut le placer dans un vase de métal poli et brillant, comme les théières d'argent; car le pouvoir émissif étant alors moindre, le refroidissement est plus lent.

Franklin, ayant exposé sur la neige des étoffes de différentes couleurs aux rayons solaires, avait trouvé que les étoffes noires s'enfoncaient plus ou moins profondément, et que les blanches n'enfoncaient pas du tout; il en avait conclu que les premières absorbaient mieux la chaleur que les dernières. Depuis, on a fait longtemps l'application de l'expérience de Franklin à nos vêtements, en montrant que les vêtements blancs sont plus frais que les noirs pendant l'été parce qu'ils absorbent moins la chaleur, et plus chauds l'hiver parce qu'ils l'émettent moins. A ce sujet, M. Tyndall observe avec raison que si tous les rayons calorifiques étaient lumineux, nous pourrions, avec certitude, de la couleur d'un corps conclure son pouvoir absorbant; mais que la grande partie de la chaleur solaire étant invisible (547), la coloration et l'absorption sont deux phénomènes distincts. En effet, le même savant a observé que trois des faces d'un cube de fer-blanc étant l'une blanchie à la craie, l'autre rougie au carmin, la troisième noircie au noir de fumée, et le cube étant rempli d'eau à 100 degrés, les trois faces, présentées à la pile du thermo-multiplicateur, impriment une déviation à l'aiguille du galvanomètre, et si l'on présente la quatrième nue, l'aiguille se rapproche aussitôt du zéro. Mêmes résultats avec un cube dont trois faces sont revêtues respectivement de papier blanc, rouge et noir, et la quatrième nue. Enfin, M. Tyndall a constaté que deux cartes, l'une blanche, l'autre noircie avec de la suie, étant présentées à un foyer, la première s'échauffe beaucoup plus que la seconde. D'où M. Tyndall conclut que, dans nos vêtements, dans la fourrure des quadrupèdes, le plumage des oiseaux, ce n'est pas la couleur qui a de l'influence, mais la texture au degré de conductibilité.

CHAPITRE X

TRANSMISSION DE LA CHALEUR AU TRAVERS DES CORPS

436. **Pouvoir diathermane.** — Outre la propriété qu'ont les corps de réfléchir, d'absorber et d'émettre plus ou moins la chaleur, plusieurs possèdent celle de se laisser traverser par la chaleur sans s'échauffer, de même que les corps transparents sont traversés par la lumière : tels sont l'air, l'eau, la glace. D'autres substances, comme les métaux, sont imperméables à la chaleur.

Melloni a appelé *substances diathermanes* les premières, et *substances athermanes* les dernières ; et l'on nomme *pouvoir diathermane* d'une substance le rapport de la quantité de chaleur qu'elle laisse passer à celle qu'elle reçoit.

437. **Expériences de Melloni.** — Pour déterminer les pouvoirs diathermanes, Melloni a fait usage de son thermo-multiplicateur,

Fig. 344.

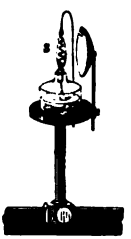


Fig. 345.

Fig. 346.

Fig. 347.

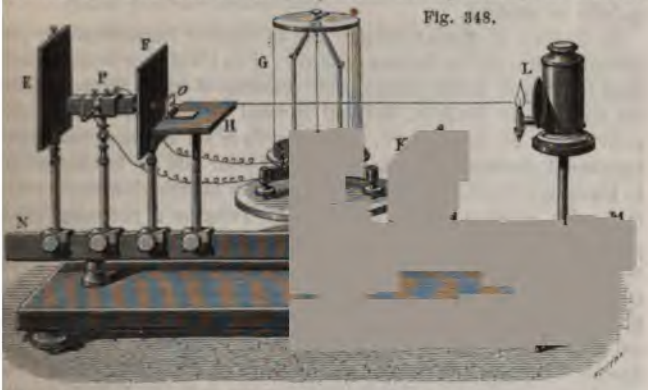
auquel il a appliqué cinq sources de chaleur : 1° une lampe Locatelli, c'est-à-dire sans verre, avec réflecteur, et à un seul courant d'air (fig. 344) ; 2° une lampe d'Argand, c'est-à-dire à double courant d'air et munie d'un verre : lampes Carcel ; 3° un fil de platine contourné en hélice et maintenu au rouge blanc dans la flamme d'une lampe à alcool (fig. 345) ; 4° un cube de cuivre rouge, noirci à l'extérieur et rempli d'eau maintenue à 100 degrés (fig. 347) ; 5° enfin, une plaque de cuivre rouge noircie et chauffée à 400 grés environ par la flamme d'une lampe à alcool (fig. 346).

De ces cinq sources de chaleur, les trois premières donnent la chaleur lumineuse, et les deux dernières de la chaleur obscu

Or on verra que, pour une même substance, le pouvoir diathermane n'est pas le même avec ces deux sortes de chaleur (438).

Le thermo-multiplicateur était disposé comme le montre la figure 348. Les substances sur lesquelles on expérimentait étaient

Fig. 348.



taillées en plaques d'une épaisseur variable, et fixées en *o* sur un support H. Après les avoir traversées, les rayons calorifiques rencontraient la pile P, et imprimaient à l'aiguille du galvanomètre une déviation qui mesurait la chaleur transmise. En comparant cette déviation à celle qu'on obtient quand la plaque est enlevée, on a le pouvoir diathermane de celle-ci.

438. **Causes qui modifient le pouvoir diathermane.** — Ces causes sont : 1° la nature de la source de chaleur ; 2° la substance des écrans ; 3° leur épaisseur.

En représentant par 100 la chaleur incidente, Melloni a obtenu le tableau suivant pour des plaques de diverses substances, de même épaisseur, et avec quatre sources de chaleur différentes.

SUBSTANCES	LAMPE de LOCATELLI	PLATINE incandescent	CUIVRE chauffé à 400°	CUIVRE chauffé à 100°
Le sel gemme laisse passer.	92	92	92	92
Le spath d'Islande	39	28	6	0
Le verre à glace	39	24	6	0
Le cristal de roche	37	18	6	0
La chaux sulfatée.	14	5	0	0
L'alun	9	2	0	0
La glace pure.	6	0	0	0

Quant à l'influence de l'épaisseur des écrans, l'expérience fait voir que la quantité de chaleur qui traverse un écran décroît quand son épaisseur augmente; mais l'absorption n'est pas proportionnelle à l'épaisseur, car c'est surtout dans les premières couches qu'elle se produit.

Le tableau ci-dessus montre que la chaleur lumineuse est plus transmissible que la chaleur obscure, si ce n'est pour le sel gemme, dont le pouvoir diathermane reste constant et égal à 92 pour toutes les sources de chaleur. Suivant Melloni, il en était encore ainsi pour toutes les épaisseurs, et il regarda le sel gemme comme parfaitement diathermane, la perte de 8 pour 100 de la chaleur qui le traversait étant attribuée uniquement à la réflexion sur les deux faces des plaques. Mais, depuis, M. Desains a reconnu que le pouvoir diathermane du sel gemme décroît quand l'épaisseur augmente et quand la température de la source est moindre; de son côté, Magnus a fait voir que pour certaines sources de chaleur obscure, et particulièrement pour celle émise par une plaque de sel gemme chauffée à 150 degrés, cette substance n'est pas plus diathermane qu'une autre; et que sa diathermanéité, loin d'être constante, varie avec l'épaisseur comme celle de tous les autres corps. Enfin, le même savant a constaté que la sylvine (chlorure de potassium) a un pouvoir diathermane au moins égal à celui du sel gemme pour toutes les sources de chaleur.

439. **Diathermanéité des gaz.** — Melloni avait admis que les gaz sont tous parfaitement diathermanes; mais M. Tyndall a trouvé que, tandis que l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, ont un pouvoir diathermane tel, qu'ils n'absorbent qu'une quantité à peine appréciable de la chaleur qui les traverse, les gaz composés, comme l'acide sulfureux, le gaz ammoniac, le gaz oléfiant, arrêtent presque complétement la chaleur, même lorsque la tension des gaz n'est que de quelques centimètres de mercure. M. Tyndall, ayant expérimenté sur de l'air humide, a trouvé qu'il absorbe 70 fois plus de chaleur que l'air sec; d'où il avait conclu que l'air humide a un pouvoir absorbant plus grand que l'air sec. Or, de son côté, Magnus trouvait que l'air sec et l'air humide ont sensiblement le même pouvoir absorbant, et qu'on n'observe de différence que lorsque l'eau se trouve dans l'air à l'état vésiculaire, c'est-à-dire à l'état qu'elle présente lorsque, se condensant dans l'air, elle devient visible. Enfin M. Wild, à Berne, a trouvé que c'est la paroi du tube dans lequel est renfermé l'air humide qui est cause de la discordance entre les résultats obtenus par M. Tyndall et par Magnus. Si, à l'intérieur, la paroi du tube est polie, l'air humide absorbe plus que l'air sec; si, au contraire, elle est noircie

recouverte de velours, l'air humide absorbe moins. C'est donc à la vapeur qui se condense sur les parois du tube qu'est due la différence des résultats obtenus.

440. Applications des pouvoirs diathermanes. — C'est par suite de leur grand pouvoir diathermane que les couches supérieures de l'atmosphère sont toujours à une basse température, malgré les rayons solaires qui les traversent. L'eau étant peu diathermane, il se produit le phénomène inverse au sein des mers et des lacs. Les couches supérieures participent aux variations de température, suivant les saisons, tandis qu'à une certaine profondeur la température reste constante.

Les propriétés des corps diathermanes ont été utilisées pour séparer la lumière et la chaleur qui rayonnent ensemble d'une même source. Le sel gemme recouvert de noir de fumée arrête complétement la lumière et laisse passer la chaleur. Au contraire, les lames ou des dissolutions d'alun arrêtent la chaleur et donnent passage à la lumière. Ce dernier procédé est appliqué avantageusement dans les appareils qu'on éclaire avec les rayons solaires ou avec la lumière électrique, lorsqu'il est nécessaire d'éviter une chaleur trop intense. L'iode dissous dans le bisulfure de carbone produit l'effet inverse : il absorbe les rayons lumineux, et laisse passer la chaleur.

Dans les jardins, l'usage des cloches dont on abrite certaines plantes est fondé sur la propriété diathermane du verre, indiquée dans le tableau ci-dessus (438) : cette substance, traversée par les rayons solaires, qui ont une haute température, ne l'est pas par la chaleur obscure qui rayonne du sol.

441. Différentes espèces de rayons calorifiques, thermochrôse. — Les propriétés que présente la chaleur, dans son passage au travers des corps, ont porté Melloni à faire sur la chaleur la même hypothèse que celle faite depuis longtemps sur la lumière. Ainsi que Newton a admis plusieurs espèces de lumière, le *rouge*, l'*orangé*, le *jaune*, le *vert*, le *bleu*, l'*indigo* et le *violet*, qui ne se transmettent pas également au travers des corps diaphanes, et qui peuvent être réunies entre elles ou isolées, de même Melloni a admis l'existence de plusieurs espèces de rayons calorifiques émis simultanément, en proportions variables, par les diverses sources de chaleur, et doués de la propriété de traverser plus ou moins facilement les substances diathermanes. Celles-ci possèdent donc une véritable *coloration* calorifique, c'est-à-dire qu'elles absorbent certains rayons de chaleur et laissent passer les autres, de la même manière qu'un verre bleu, par exemple, est traversé par la couleur bleue, et ne l'est pas par les autres couleurs. Melloni a

donné le nom de *thermochrose* à cette propriété de la chaleur d'être composée de rayons de différentes espèces.

La théorie de Melloni s'explique, dans le système des ondulations, en admettant que les propriétés des différentes espèces de rayons calorifiques sont dues à des nombres de vibrations différents, ou à des ondes calorifiques d'inégale longueur.

Cette théorie est adoptée aujourd'hui par tous les physiciens; nous y reviendrons en traitant du *spectre calorifique*, dont l'étude est intimement liée à celle du spectre lumineux.

CHAPITRE XI

SOURCES DE CHALEUR ET DE FROID

442. **Différentes sources de chaleur.** — D'après la théorie de la thermo-dynamique, il n'y a en réalité qu'une seule source de chaleur, le mouvement imprimé aux molécules de la matière; seulement, on peut obtenir celui-ci de plusieurs manières; de là: 1° *sources mécaniques*, comprenant le frottement, la percussion, la pression et le choc; 2° *sources physiques*, savoir: la radiation solaire, la chaleur terrestre, les actions moléculaires, les changements d'état et l'électricité; 3° *sources chimiques*, c'est-à-dire les combinaisons moléculaires, et notamment la combustion.

Sources mécaniques.

443. **Chaleur due au frottement.** — Le frottement de deux corps l'un contre l'autre développe une quantité de chaleur d'autant plus grande, que la pression est plus forte et le mouvement plus rapide. Souvent les boîtes des roues de voitures, par leur frottement contre l'essieu, s'échauffent jusqu'à prendre feu. H. Davy a fondu deux morceaux de glace en les frottant l'un contre l'autre, dans une atmosphère au-dessous de zéro. En forant, sous l'eau, une masse de bronze, Rumford a trouvé que, pour obtenir 250 grammes de limaille, la chaleur développée par le frottement est capable d'élever 25 kilogrammes d'eau de zéro à 100 degrés, ce qui représente 2 500 calories. Baumont et Mayer, à Paris, ont construit, en 1855, un appareil dans lequel ils élevaient, en quelques heures, 400 litres d'eau, de 10 à 130 degrés, par le frottement d'un cône de bois recouvert de chanvre, tournant, avec une vitesse de tours par minute, dans un cône de cuivre creux, fixe et plongé dans l'eau d'une chaudière hermétiquement fermée. Les surfaces frottées étaient constamment graissées d'huile.

L'expérience de Rumford et celle de Baumont et Mayer demandent trop de temps pour qu'on puisse les répéter dans un cours; nous empruntons à M. Tyndall un appareil qui, en quelques minutes, fait voir la chaleur développée par le frottement. Il se compose d'un tube de laiton, creux et plein d'eau, auquel on imprime

Fig. 349.

un mouvement de rotation rapide au moyen d'une poulie sur laquelle il est fixé, d'une grande roue et d'une courroie sans fin (fig. 349). Le tube a 10 centimètres de hauteur et 2 de diamètre. Pour que l'expérience dure moins longtemps, on le remplit d'eau tiède, et on le ferme avec un bouchon, afin que l'eau ne soit pas projetée par l'effet de la rotation. Autour du tube s'applique une pince de bois formée de deux planchettes réunies par une charnière, et entaillées d'une rainure pour mieux embrasser le tube. Tandis que d'une main on fait tourner la grande roue, de l'autre on serre le tube entre les planchettes. Il s'échauffe alors rapidement par le frottement, et bientôt la température de l'eau dépassant 100 degrés, le bouchon est lancé par la tension de la vapeur.

Dans le briquet à pierre, c'est par l'effet du frottement de l'acier contre le silex que les parcelles métalliques qui se détachent s'échauffent jusqu'à prendre feu dans l'air.

Dans toutes ces expériences, la chaleur dégagée par le frottement est due à un mouvement vibratoire imprimé aux molécules des corps; dans toutes, c'est du travail transformé en chaleur.

444. **Chaleur due à la pression et à la percussion.** — Si l'on comprime un corps de manière à augmenter sa densité, sa température s'élève d'autant plus, que la diminution de volume est plus grande. Peu sensible dans les liquides, ce phénomène l'est

davantage dans les solides ; dans les gaz, qui sont extrême compressibles, il y a un dégagement de chaleur considérabl au travail consommé pendant la compression.

On démontre le vif dégagement de chaleur qui se produit les gaz comprimés au moyen du *briquet à air*. Cet appar compose d'un tube de verre à paroi épaisse, dans lequel e piston de cuir fermant hermétiquement (fig. 350). A la base piston est une cavité où l'on place un petit morceau d'amado

Fig. 350.

tube étant plein d'air, on enfonce brusquement le piston comprimé s'échauffe alors jusqu'à enflammer l'amadou, qu'c brûler si l'on retire rapidement le piston. L'inflammation de dou dans cette expérience suppose une température d'au 300 degrés. Au moment de la compression, il se produit u mière assez vive qu'on a d'abord attribuée à la haute ter ture à laquelle l'air est porté ; mais on a reconnu qu'elle e à la combustion de l'huile qui graisse le piston.

C'est par l'élévation de température qu'elle fait naître pression suffit pour déterminer la combinaison, et, par su détonation d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène.

La percussion est aussi une source de chaleur, ainsi qu constate en battant sur une enclume un métal malléable.

Dans la percussion comme dans la pression, l'échauffem dû à un travail extérieur transformé en chaleur.

445. **Expériences de Tyndall sur la compression des g** Nous empruntons à M. Tyndall les deux expériences suiv qui font bien voir, dans le phénomène de la compression de la transformation de la chaleur en travail mécanique, et, ré quement, du travail mécanique en chaleur.

On prend un vase de métal à parois résistantes, et mun robinet. Ayant vissé une pompe de compression sur ce robin comprime de l'air dans le vase, et comme le gaz s'est échau *la pression*, on laisse refroidir pendant plusieurs heures, j

xpulse lui-même. Il y a donc travail exécuté par le gaz, et, ite, d'après la théorie dynamique de la chaleur, il doit y isparition de chaleur. En effet, si l'on reçoit le jet de gaz

Fig. 352.

la déviation de l'aiguille du galvanomètre se fait dans le sens opposé, ce qui fait voir qu'il y a échauffement. En effet, dans la première expérience, le travail mécanique de pousser l'air en avant étant exécuté par l'air lui-même, une portion de sa chaleur est consommée dans cet effort; tandis que, dans le cas du soufflet, c'est la main de l'expérimentateur qui exécute le travail. Ici, comme dans le briquet à air, c'est un travail extérieur qui est transformé en chaleur; dans l'expérience de la figure 351, c'est un travail intérieur qui ne se fait qu'avec dépense de chaleur.

446. **Chaleur engendrée par le choc.** — Lorsqu'on laisse tomber une bille d'ivoire sur un corps dur, elle rebondit en vertu de son élasticité, et par suite ne s'échauffe pas, parce que le travail développé par la chute de la bille est ensuite consommé pour l'élever (38). Mais qu'on laisse tomber une bille de plomb, qui n'est pas élastique et ne rebondit pas, elle s'échauffe sensiblement, sa force vive étant transformée en chaleur (270). De même, lorsqu'on tire une balle contre un mur, celle-ci se trouvant arrêtée brusquement, sa force vive se transforme en travail extérieur qui aplatit le plomb et dégrade le mur, et en travail intérieur qui se manifeste sous forme de chaleur.

En Angleterre, en 1863, pour essayer des plaques de fonte destinées au blindage de frégates cuirassées, on tirait dessus à courte distance avec des canons Armstrong. Or, au moment où les boulets, frappant ces plaques, se trouvaient arrêtés, leur force vive se transformait en chaleur, et ils atteignaient subitement la température rouge.

Sources physiques.

447. **Radiation solaire.** — De toutes les sources de chaleur, la plus intense est le soleil. On ignore la cause de la chaleur émise par cet astre, que les uns ont regardé comme une masse embrasée, éprouvant d'immenses éruptions, et que d'autres ont considéré comme étant composé de couches réagissant chimiquement les unes sur les autres, à la manière des couples de la pile voltaïque, et donnant ainsi naissance à des courants électriques auxquels seraient dues la lumière et la chaleur solaires. Dans l'une et l'autre hypothèse, l'incandescence du soleil aurait son terme.

Depuis la théorie dynamique de la chaleur, on a proposé d'expliquer la continuité de la chaleur du soleil par la chute, sur cet astre, d'une pluie d'astéroïdes. On sait qu'on nomme ainsi les masses météoriques qui traversent l'atmosphère sous le nom d'étoiles filantes, et qui apparaissent en très-grand nombre, surtout dans les nuits des 9, 10 et 11 août et des 12, 13, 14 et 27 novem-

chaque année. Dans la nuit du 27 novembre 1872, de sept et demie à une heure, le P. Secchi, à Rome, a observé étoiles filantes.

masses, tombant sur le soleil avec des vitesses qui surpas- beaucoup celles que nous observons à la surface du globe, peraient, par leur choc, une quantité de chaleur énorme arerait la perte de chaleur du soleil par le rayonnement. ait pour cela que la couche des astéroïdes tombés annuel- sur le soleil atteignît une épaisseur de 20 mètres, accrois- de volume trop lent pour pouvoir être apprécié par nos ents. Cette hypothèse a été proposée par le docteur Mayer, enue par Waterston et W. Thomson.

entatives ont été faites pour mesurer la quantité de cha- ise annuellement par le soleil. Pouillet, au moyen d'un l qu'il a nommé *pyrhéliomètre*, a estimé que si la quantité e chaleur que la terre reçoit du soleil dans le cours d'une tait tout entière employée à fondre de la glace, elle serait d'en fondre une couche d'une épaisseur de 31^{m},89 tout du globe. Or, d'après la surface que la terre présente au ment du soleil, et d'après la distance qui l'en sépare, elle t que $\frac{1}{238\,000\,000}$ de la chaleur émise par cet astre.

Chaleur terrestre. — Le globe terrestre possède une cha- re qu'on désigne sous le nom de *chaleur centrale*. En ne profondeur peu considérable, qui varie suivant les rencontre une couche dont la température reste con- te l'année; d'où l'on conclut que la chaleur solaire ne u-dessous du sol, qu'à une profondeur déterminée. essous de cette couche, qu'on désigne sous le nom de *ariable*, la température augmente, en moyenne, d'un sure qu'on s'enfonce de 30 mètres. Cette loi de l'ac- de la température du sol a été vérifiée, à de grandes , dans les mines et dans les puits artésiens. Toutefois aucoup avec la conductibilité des terrains, et est très- s les mines par la circulation de l'air et de l'eau. En qu'à une profondeur de 3 000 mètres, la température correspondante serait déjà de plus de 100 degrés. Les s et les volcans confirment l'existence de la chaleur

ur à laquelle est la couche invariable n'est pas la Paris, elle est de 27 mètres; à cette profon- re est toute l'année de 11°,8.

ses ont été faites pour expliquer la chaleur cen- ralement admise par les physiciens et les

Toutefois, plusieurs physiciens, au nombre desquels W. Thomson, Huggins, en s'appuyant sur les phénom nomiques de la précession, de la nutation et des maré conduits à admettre que la terre est solide dans toute et ils expliquent la chaleur centrale par des actions dues à l'infiltration des eaux de la mer.

449. Chaleur dégagée par l'imbibition et par l'absorp phénomènes moléculaires, comme l'imbibition, l'abs actions capillaires, sont, en général, accompagnés d' ment de chaleur. Pouillet a observé que toutes les fo quide est versé sur un solide très-divisé, il y a une é température qui varie selon la nature des substances. A tières inorganiques, comme les métaux, les oxydes, l'élévation de température est de 2 à 3 dixièmes de avec les matières organiques, comme les éponges, la midon, les racines en poudre, les membranes dessé croissement de température varie de 1 à 10 degrés.

L'absorption des gaz par les corps solides présent phénomène. Dobereiner a trouvé que, si l'on place dan du platine très-divisé, comme on l'obtient à l'état de pr mique, sous le nom de *noir de platine*, ce métal absorb centaines de fois son volume d'oxygène, et la tempéra alors assez pour donner naissance à des combus ses. L'*éponge* ou *mousse de platine*, qui s'obtie le chlorure de platine par le sel ammoniac, pro fot. Un jet d'hydrogène dirigé dessus prend fo

bord aucune issue, refoule l'eau du vase B dans le vase A, jusqu'à ce que, le zinc ne plongeant plus, la réaction s'arrête. Le bouchon du vase supérieur est usé latéralement de manière à en laisser sortir l'air à mesure que l'eau s'élève. Une tubulure de cuivre H, fixée sur le côté du vase B, porte un petit cône *a* percé d'un orifice au-dessus duquel, dans une capsule *c*, est une éponge de platine.

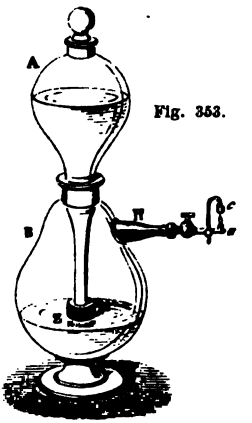


Fig. 353.

Par suite, dès qu'on ouvre le robinet qui ferme le tube H, l'hydrogène se dégage et s'enflamme au contact du platine. Il faut avoir soin de ne présenter celui-ci au courant d'hydrogène que lorsque ce gaz a entraîné tout l'air qui peut se trouver dans le vase B; sinon il y aurait une vive détonation due à la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène contenus dans ce vase.

M. Fabre, qui a fait des recherches sur la chaleur dégagée lorsqu'un gaz est absorbé par le charbon (167), a trouvé que la chaleur dégagée par l'absorption de 1 gramme d'acide sulfureux ou de protoxyde d'azote surpasse de beaucoup la chaleur qui résulte de la liquéfaction d'un poids égal des mêmes gaz; pour l'acide carbonique, la chaleur dégagée par l'absorption dépasse même celle qui le serait par la solidification de ce gaz. D'où l'on doit conclure que la chaleur produite par l'absorption des gaz ne peut s'expliquer complétement en admettant que le gaz absorbé se liquéfie et même se solidifie dans les pores du charbon, mais qu'il faut admettre, en outre, une action spéciale entre les molécules du charbon et celles du gaz, action que Mitscherlich a désignée sous le nom d'*affinité capillaire*.

La chaleur produite dans les changements d'état a déjà été traitée aux articles *Solidification* et *Liquéfaction* (334 et 365); quant à la chaleur développée par l'électricité, cette question trouvera sa place dans la théorie des phénomènes électriques.

Sources chimiques.

450. Combinaisons chimiques, combustion. — Les combinaisons chimiques sont généralement accompagnées d'un dégagement de chaleur plus ou moins abondant. Quand elles s'opèrent [illegible], comme lorsque le fer s'oxyde à l'air, la chaleur déga

divisé, ou des fragments de phosphore, ces corps s'u
chlore avec un vif dégagement de chaleur et de lumière

Plusieurs combustibles brûlent avec flamme. Une *fla*
autre chose qu'un gaz ou une vapeur portés à une haut
ture par l'effet d'une combinaison chimique. Son pouvoi
varie avec les produits qui se forment pendant la combi
présence d'un corps solide dans une flamme en augme
voir éclairant. Les flammes d'hydrogène, d'oxyde de
d'alcool, sont pâles, parce qu'elles ne renferment que d
gazeux. Mais les flammes des bougies, des lampes, du
rage, ont un grand pouvoir éclairant, parce qu'elles c
un excès de carbone qui, n'éprouvant qu'une combust
plète, devient incandescent dans la flamme. On donne
sité beaucoup plus grande à une flamme en y plaçant
platine ou de l'amiante. La température d'une flamme
rapport avec son pouvoir éclairant. La flamme d'hydr
est la plus pâle, est celle dont la température est plus é

451. **Chaleur dégagée pendant la combustion.** — Plus
siciens, et particulièrement Lavoisier, Rumford, Des
long, Hess, Silbermann et M. Fabre, se sont occupés
cher les quantités de chaleur dégagées par les différ
pendant la combustion et pendant les combinaisons.

Pour ces expériences, Lavoisier s'est servi du
glace qui a été décrit précédemment (395). Rumfo
d'un calorimètre connu sous son nom, et qui consis

mbres obtenus par ces deux physiciens, en prenant chaleur la quantité nécessaire pour élever de 1 de-ature de 1 gramme d'eau :

ur de combustion pour 1 gramme de combustible.

vec oxygène.	33 462	Graphite naturel	7 796
vec chlore. .	23 783	Diamant	7 770
térébenthine .	10 852	Alcool absolu.	7 184
ique	9 027	Oxyde de carbone	2 403
bois	8 080	Soufre natif	2 262

la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques.

t de Dulong, de Despretz, de Hess, de Fabre et Sil-l'autres physiciens, on a tiré les lois suivantes sur de la chaleur dans les actions chimiques :

qui brûle produit toujours la même quantité de cha-rer au même degré d'oxydation, soit qu'il l'atteigne it, soit qu'il n'y arrive que progressivement. Par gramme de carbone qui se transforme directement mique dégage la même quantité de chaleur que s'il transformé en oxyde de carbone, puis celui-ci en ne.

combinaison chimique, quelle qu'en soit la durée, chaleur dégagée est toujours la même.

égagée dans la combustion d'un corps composé e la somme des quantités de chaleur qu'on ob-éparément chacun de ses éléments.

de platine. Le métal liquéfié est alors fortement incan
qu'il répand, lorqu'on ouvre le moufle, un éclat comp
celui de la lumière électrique.

On parvient aussi à fondre le platine par la combustio
d'éclairage avec l'air; mais il faut que celui-ci soit com
moins à deux atmosphères.

On doit à Bunsen un appareil connu sous le nom de *b*
Bunsen, dont l'usage est très-répandu dans les labora
consiste encore en deux tuyaux concentriques; le gaz d'
arrive par le tuyau central, et l'air est aspiré entre les de
par le tirage. Un seul brûleur suffit pour fondre l'argent

CHAUFFAGE

454. Différentes sortes de chauffage. — Le *chauffage* e
qui a pour objet d'utiliser, dans l'économie domestiqu
l'industrie, les sources de chaleur que nous offre la nat

La source de chaleur principalement en usage jusqu'à
est la combustion du bois, du charbon, de la houille,
de la tourbe et de l'anthracite. Depuis quelques années
le gaz d'éclairage et les huiles essentielles pour le chauf

D'après les appareils qui servent à la combustion, on
tinguer cinq sortes de chauffage : 1° chauffage à foyer e
les cheminées; 2° chauffage à foyer intérieur, les poe
fage par l'air chaud, calorifères; 4° chauffage par l
chauffage par circulation d'eau chaude.

455. Cheminées. — On sait que les cheminées s

ıières cheminées, quoique placées contre les murs, s entourées de chambranles, mais seulement surmon- *hotte* qui donnait dégagement à la fumée. Ce n'est que mps modernes qu'on a donné aux cheminées la forme t aujourd'hui. Ce sont des physiciens qui les ont suc- t perfectionnées, et particulièrement Philibert De- ger, Franklin, Montgolfier et Rumford.

perfectionnements qu'on ait apportés à la construc- eminées, elles sont encore le mode de chauffage le lait et le plus dispendieux; car elles n'utilisent, avec nviron 6 pour 100 de la chaleur totale dégagée par le), et 13 avec le coke et la houille. Cette perte énorme provient de ce que le courant d'air nécessaire à la entraînant toujours une portion considérable de la nduite, celle-ci va se perdre en grande partie dans e. C'est ce qui avait fait dire à Franklin que, si l'on ur une quantité de combustible donnée, obtenir le haleur possible, il faudrait adopter les cheminées. elles sont et seront toujours le mode de chauffage le le et le plus sain, par la l feu et par le renouvel- linu qu'elles entretien- 'air des appartements.

ge des cheminées. — On *tirage* d'une cheminée de bas en haut qui ıs le tuyau par l'effet de des produits de la com- ıand le courant est ra- linu, on dit que la che- bien.

est dû à la différence ture à l'intérieur et à car, en vertu de cette les matières gazeuses ssent le tuyau étant es que l'air de l'apparte-

Fig. 354.

ilibre est impossible (172). En effet, le poids de la co- ıse CD (fig. 354), dans le tuyau, étant moindre que celui ıe d'air extérieure AB, de même hauteur, il en résulte, ır vers l'intérieur, un excès de pression qui refoule les la combustion d'autant plus rapidement, que la diffé- ıds entre les deux masses gazeuses est plus grande.

On constate très-bien l'existence des courants que font naître dans les gaz les différences de température, au moyen de l'expérience suivante. On ouvre une porte mettant en communication une pièce chauffée avec une qui ne l'est pas, puis on tient, vers le haut de la porte, une bougie allumée; on voit alors la flamme se diriger de la pièce chaude vers la pièce froide. Au contraire, si l'on pose la bougie sur le sol, la flamme se dirige de la pièce froide vers la pièce chaude. Ces deux effets sont dus à un courant d'air chaud qui s'échappe par le haut de la porte, tandis que l'air froid et plus dense qui vient le remplacer, arrive par le bas.

Pour avoir un bon tirage, une cheminée doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° La section du tuyau doit avoir la dimension strictement nécessaire pour l'écoulement des produits de la combustion; autrement, si cette section est trop grande, il s'établit à la fois des courants ascendants et des courants descendants, et la cheminée fume. Il est bon de placer au sommet du tuyau une buse conique plus étroite que lui, afin que la fumée sorte avec une vitesse suffisante pour résister à l'action du vent.

2° Le tuyau de la cheminée doit être suffisamment élevé; car le tirage ayant pour cause l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure dans le tuyau, cet excès de pression sera d'autant plus grand, que la colonne d'air échauffé sera plus haute.

3° L'air extérieur doit pouvoir pénétrer dans l'appartement où est la cheminée assez rapidement pour répondre à l'appel du foyer. Dans un appartement hermétiquement fermé, la combustion ne pourrait se prolonger, ou il s'établirait des courants d'air descendants qui rabattraient la fumée. L'air entre ordinairement en quantité suffisante par les joints des portes et des croisées.

4° On doit toujours éviter de faire communiquer entre eux deux tuyaux de cheminée; car si l'un tire plus que l'autre, il se produit dans ce dernier un courant d'air descendant qui ramène la fumée.

457. **Poêles.** — Les *poêles* sont des appareils de chauffage à foyer isolé, placés au milieu même de la masse d'air qu'on veut échauffer, en sorte que la chaleur rayonne dans toutes les directions autour du foyer. A la partie inférieure est la prise d'air nécessaire à la combustion, dont les produits se dégagent, à la partie supérieure, par des tuyaux de tôle plus ou moins longs. Ces produits gazeux sortant ainsi très-refroidis, on parvient à utiliser presque totalité de la chaleur développée; aussi ce mode de chauffage est-il le plus économique; mais il est loin d'être aussi salubre que les cheminées, car il ne donne qu'une ventilation très-faible et même nulle, quand la prise d'air se fait à l'extérieur, comme

a lieu dans les poêles suédois. Les poêles ont, en outre, l'in-
énient de répandre une odeur désagréable et nuisible, sur-
lorsqu'ils sont de fonte ou de tôle, ce qui peut être attribué à
écomposition des matières organiques qui sont dans l'air par
contact avec les parois chaudes des tuyaux; et aussi à ce que
nte étant, à une température élevée, perméable aux gaz des
rs (168), ces gaz vicient l'air.

8. **Chauffage par la vapeur.** — La propriété qu'ont les vapeurs
estituer leur chaleur de vaporisation, lorsqu'elles se conden-
, a été utilisée pour le chauffage des bains, des ateliers, des
ces publics, des serres, des étuves. Pour cela, on produit la
eur dans des chaudières analogues à celles des machines à va-
r; puis on la fait circuler dans des tuyaux placés dans le lieu
l s'agit de chauffer. La vapeur se condense dans ces tuyaux et
cède toute sa chaleur latente, qui devient libre au moment de
ondensation. Cette chaleur se transmet ensuite à l'air extérieur
u liquide dans lequel sont placés les tuyaux de conduite.

9. **Chauffage par l'air chaud.** — Le chauffage par l'air chaud
iste à chauffer de l'air dans la partie inférieure d'un édifice, et

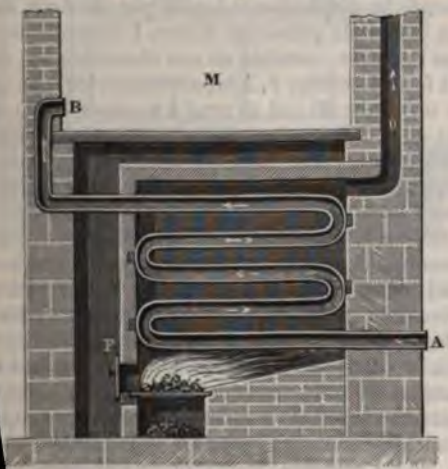


Fig. 355.

ensuite s'élever jusqu'aux étages supérieurs, en vertu
re densité, dans des tuyaux de conduite placés dans
ppareil est disposé comme le montre la figure 355. Un
établi dans les caves, contient, à la suite les uns des
stème de tubes recourbés AB, dont un seul est visible

dans le dessin. C'est par l'orifice inférieur A, qui est la *prise d'air*, que l'air extérieur pénètre dans les tubes; là il s'échauffe, et, s'élevant dans le sens des flèches, pénètre dans les appartements M par l'orifice supérieur B, qu'on nomme *bouche de chaleur*. Dans les différents étages, chaque pièce a ainsi une ou plusieurs bouches de chaleur, qui se placent le plus bas possible, l'air chaud tendant toujours à monter.

Le conduit O est un tuyau de cheminée ordinaire par lequel se dégagent du fourneau les produits de la combustion.

Ces appareils, nommés *calorifères*, sont beaucoup plus économiques que les cheminées; mais ils ne peuvent ventiler aussi bien les appartements, et, par conséquent, sont moins salubres.

460. **Chauffage par circulation d'eau chaude.** — Le chauffage par circulation d'eau chaude consiste en un mouvement circulatoire continu d'eau qui, après s'être échauffée dans une chaudière, s'élève dans une série de tubes; puis, après s'être refroidie, revient à la chaudière par une série semblable.

Le premier appareil propre à ce genre de chauffage fut inventé par Bonnemain, en France, vers la fin du siècle dernier. La figure 356 représente la disposition adoptée par M. Léon Duvoir pour chauffer un édifice de plusieurs étages. L'appareil de chauffage, qui est dans les caves, consiste en une chaudière *oo*, en forme de cloche, et à foyer intérieur F. A la partie supérieure de la chaudière est fixé un long tube M, qui se rend à un réservoir Q, placé dans les combles de l'édifice qu'on veut chauffer. Ce réservoir porte, à sa partie supérieure, une tubulure *n* fermée par une soupape qu'on charge plus ou moins, de manière à limiter la tension de la vapeur dans l'intérieur de l'appareil.

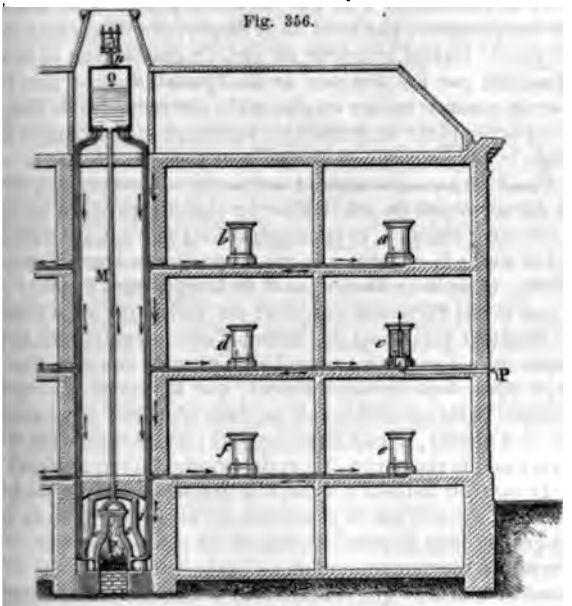
La chaudière et le tube M étant remplis d'eau, ainsi qu'une partie du réservoir Q, à mesure que l'eau s'échauffe dans la chaudière il se produit, dans le tube M, un courant ascendant d'eau chaude jusqu'au réservoir Q, tandis qu'en même temps s'établissent des courants descendants d'eau moins chaude et plus dense, partis de la partie inférieure de ce réservoir, et se rendant respectivement par autant de tubes dans des récipients *b*, *a*, remplis d'eau. Puis de ceux-ci partent de nouveaux tubes dans lesquels le courant descendant se continue jusqu'à d'autres récipients *d*, *c*, *e*, et enfin, de ces derniers, le courant se continue, par des tubes de retour, jusqu'à la partie inférieure de la chaudière.

Pendant ce double parcours, l'eau chaude cédant sa chaleur sensible aux tubes et aux récipients, ceux-ci s'échauffent et deviennent de véritables poêles à eau. On en calcule facilement le nombre et les dimensions, pour chauffer un espace déterminé

ppuyant sur cette donnée de l'expérience et de la théorie, qu'un e d'eau suffit pour communiquer la chaleur nécessaire à 3 200 es d'air. Deux de ces poêles peuvent, pendant les froids, entenir 600 à 700 mètres cubes d'air à 15 degrés.

Dans l'intérieur des récipients *a, b, c, d, e, f,* sont des tubes

Fig. 356.



fonte remplis d'air pris à l'extérieur par des tubes P, placés dessous du plancher. Cet air s'échauffe dans les tubes, et se ge ensuite à la partie supérieure des récipients.

e principal avantage de ce mode de chauffage est de donner temperature sensiblement constante, la masse d'eau contenue s les récipients et dans les tubes ne se refroidissant que lente- t; aussi l'usage en est-il très-répandu pour les serres, les es, l'incubation artificielle, et, en général, dans tous les cas on a besoin d'une température uniforme.

SOURCES DE FROID

8. Diverses sources de froid. — Les sources de froid sont : le ge de l'état solide à l'état liquide, celui de l'état liquide à l'é- e vapeur ou de gaz, la dilatation des gaz, le rayonnement en

général, et particulièrement le rayonnement nocturne. Ayant déjà fait connaître les deux premières (339 et 364), nous ne parlerons ici que des deux dernières.

462. **Froid produit par la dilatation des gaz.** — On a vu (444) que, par la compression des gaz, la température s'élève; réciproquement, la raréfaction d'un gaz est accompagnée d'un abaissement de température, par suite de la disparition de chaleur occasionnée par le travail intérieur du gaz. Ce phénomène se trouve déjà démontré par l'expérience de M. Tyndall donnée plus haut (445); on le constate encore en plaçant le thermomètre de Breguet (289) sous le récipient de la machine pneumatique : à chaque coup de piston, le gaz se dilate et l'aiguille avance vers le zéro.

463. **Froid dû au rayonnement nocturne.** — Pendant le jour, la surface du sol reçoit du soleil plus de chaleur qu'elle n'en émet vers les espaces célestes, et la température s'élève. C'est l'inverse pendant la nuit : la chaleur que rayonne alors la terre n'est plus compensée, et de là un abaissement de température d'autant plus grand, que le ciel est moins nuageux; car, lorsqu'il y a des nuages, ceux-ci émettent vers le sol des rayons d'une intensité bien moins faible que celle des rayons venant des espaces célestes. On observe, en effet, dans certains hivers, que les rivières ne gèlent pas, quoique le thermomètre soit pendant plusieurs jours au-dessous de — 5 degrés, le ciel étant couvert; tandis que, dans d'autres hivers moins rigoureux, les rivières gèlent lorsque le ciel est serein. Le pouvoir émissif a aussi une grande influence sur le refroidissement produit par le rayonnement nocturne : plus ce pouvoir est grand, plus le refroidissement est considérable.

On verra, en Météorologie, que c'est le refroidissement dû au rayonnement nocturne qui est cause du phénomène de la rosée.

Au Bengale, le refroidissement nocturne est utilisé pour obtenir artificiellement de la glace. A cet effet, pendant les nuits sereines, on expose sur le sol, en ayant soin de les isoler sur des substances non conductrices, comme de la paille ou des feuilles sèches, de grands vases plats, remplis d'eau. Là, par l'effet du rayonnement nocturne, ces vases se refroidissent assez pour que l'eau se congèle, même quand l'air est à 10 degrés au-dessus de zéro.

CHAPITRE XII

MACHINES A VAPEUR

464. **Objet des machines à vapeur.** — Les *machines à vapeur* sont des appareils qui servent à utiliser la force élastique de la vapeur d'eau comme

a. Dans les machines généralement usitées, la vapeur, en vertu de sa force ue, imprime à un piston un mouvement rectiligne alternatif, qui est en- ransformé en mouvement circulaire continu, à l'aide de divers organes ques. Ces machines sont dues à Watt, célèbre ingénieur anglais.

le machine à vapeur se composant de deux parties bien distinctes, l'ap- où se produit la vapeur et la machine proprement dite, nous décrirons l le premier appareil.

Générateur de vapeur. — On appelle *générateur*, ou *chaudière*, l'ap- qui sert à la production de la vapeur. La figure 357 représente une vue dinale, et la figure 358 une coupe transversale d'un générateur de ma- ire. Ceux des locomotives et des bateaux à vapeur en diffèrent beaucoup. érateur consiste en un long cylindre de tôle PQ fermé à ses deux extré- par deux calottes sphériques. Au-dessous sont deux cylindres B, B, d'un etit diamètre, également de tôle, et communiquant avec le générateur par deux tubulures. Ces cylindres se nomment *bouilleurs*. Destinés à re- le coup de feu du foyer, ils sont complétement remplis d'eau, tandis que dre PQ l'est seulement à un peu plus de moitié. Au-dessous des bouil- st le foyer, dans lequel on brûle de la houille ou du coke. Afin de multi- surface de chauffe et d'utiliser toute la chaleur entraînée par les pro- e la combustion, on fait circuler ceux-ci dans des conduits de briques qui nt les parois des bouilleurs et du générateur. Ces conduits, qu'on nomme ux, divisent le fourneau en deux compartiments horizontaux F, F, et D (fig. 358). En outre, le compartiment supérieur est partagé en trois ux distincts D, C, D, par deux cloisons verticales, qui ne sont pas re- ées dans le dessin et correspondent des deux côtés aux bouilleurs. La et les produits de la combustion, rasant d'abord le dessous des bouilleurs ; en arrière, reviennent en sens contraire par le carneau central; puis, nt, ils se rendent enfin par les carneaux latéraux D, D, dans le tuyau a cheminée, d'où ils se perdent dans l'atmosphère.

Légende explicative des figures 357 et 358.

Bouilleurs au nombre de deux; ils sont toujours pleins d'eau, et, placés au centre du foyer, ils reçoivent directement le coup de feu.

D ***Carneaux*** qui entourent les bouilleurs et les parois inférieures du générateur. Ils servent à utiliser la chaleur entraînée par les produits de la combustion.

Flotteur du sifflet d'alarme *s*.

Foyer.

Flotteur destiné à indiquer le niveau de l'eau dans la chaudière. Il se compose d'une pierre rectangulaire plongeant en partie dans l'eau, comme le montre la déchirure pratiquée dans la paroi du générateur. Cette pierre, qui est suspendue à l'extrémité d'un levier, est maintenue en équilibre par la perte de poids qu'elle éprouve dans l'eau et par un contre-poids *a*. Tant que l'eau s'élève à la hauteur voulue, le levier qui soutient le flotteur reste horizontal; mais il incline vers F′ lorsqu'il n'y a pas assez d'eau, et en sens contraire, s'il y en a trop. Dans l'un comme dans l'autre cas, le chauffeur est prévenu pour régler convenablement l'introduction de l'eau d'alimentation.

Tuyau de cheminée par lequel se dégagent les produits de la combustion. C'est pour activer le tirage qu'on donne à ce tuyau une très-grande hauteur.

Générateur cylindrique de tôle, relié aux bouilleurs par quatre tubulures, et rempli d'eau à un peu plus de moitié.

Soupape de sûreté, déjà décrite en parlant de la marmite de Papin (362).

Trou d'homme, qui s'ouvre pour les nettoyages et les réparations du gé-

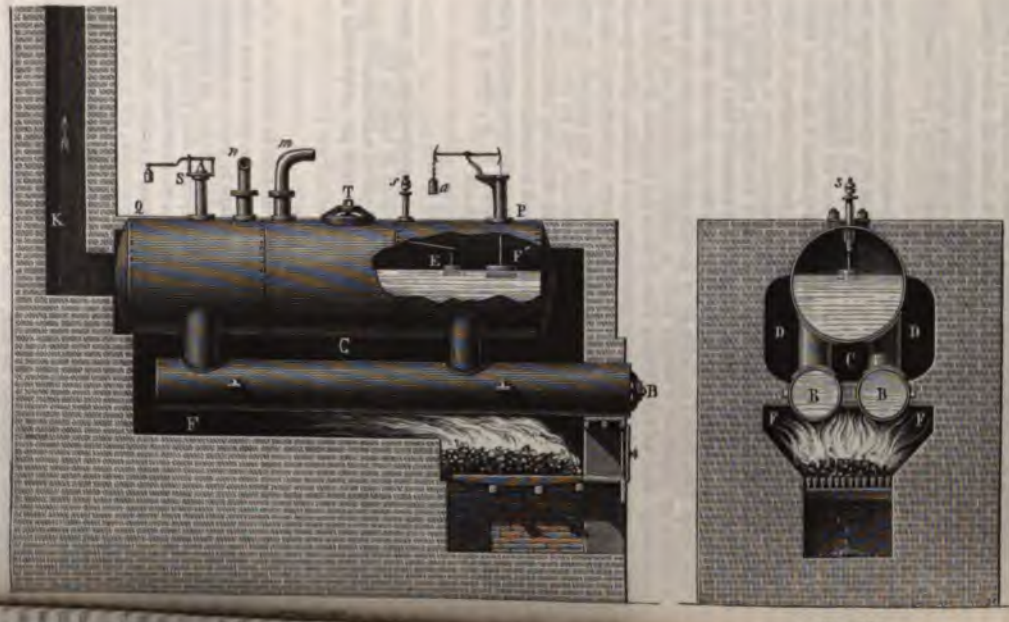


Fig. 358.

explosion lors de la rentrée de l'eau, parce qu'alors les parois étant
ges, il se produit un excès de vapeur au moment où l'eau rentre.
it que le niveau n'est pas trop bas dans la chaudière, la vapeur ne
se pas dans le sifflet ; mais si le niveau baisse au-dessous de la hau-
r convenable, un petit flotteur E, qui ferme le pied du sifflet, des-
d et donne issue à la vapeur. Celle-ci, en s'échappant, vient raser
bords d'un disque métallique mince, et, le mettant en vibration,
fait rendre un son, qui avertit le chauffeur.

es à vapeur à double effet. — On nomme *machines à double*
lesquelles la vapeur agit alternativement en dessus et en des-
pour lui imprimer un mouvement rectiligne alternatif, qu'on
ite en mouvement circulaire continu.

donne une vue d'ensemble d'une machine à vapeur à double
ures 360 et 361 représentent une coupe verticale du cylindre et
on de vapeur. Cette machine est toute de fonte, et supportée par
même métal.

du dessin est un cylindre *p*, dans lequel la vapeur arrive du gé-
n tube *x*. C'est dans ce cylindre, dont la figure 361 montre la
, qu'est le piston T, sur lequel la vapeur agit alternativement de
le bas en haut. La tige A du piston, participant à ce double mou-
semet à une longue pièce B qu'on nomme *bielle*, et qui s'articule
xtrémité de la tige A, et de l'autre à une pièce plus petite M, qui
e. Du mouvement ascendant ou descendant de la bielle, la mani-
mouvement circulaire continu qu'elle transmet à l'*arbre de*
iel elle est invariablement fixée.

extrémité, cet arbre de couche porte une poulie G, sur laquelle
oie sans fin XY. C'est cette courroie qui, entraînée par la pou-
loin le mouvement à des machines-outils, telles que tours, la-
s, presses à imprimer, etc. A côté de la poulie G en est une se-
pas fixée à l'arbre, et qu'à cause de cela on nomme *poulie folle*.
ter le mouvement des machines-outils que fait marcher la machine
arrêter cette dernière. Pour cela, au moyen d'une fourchette de

Fig. 359 ($h = 2^m$).

qui résulte de la rotation des boules avec la tige c tend constamment diverger et à ouvrir le parallélogramme. De là, suivant le plus ou itesse de la machine, un mouvement de haut en bas ou de bas en haut, asmet à une douille *r*, glissant le long de la tige *c*. C'est cette douille ne suite de leviers *s*, *t*, O, fait ouvrir ou fermer une valve *v* (fig. e dans le tuyau *x* par lequel arrive la vapeur. Cette valve est dis- nanière qu'elle se ferme d'autant plus, que les boules du régulateur davantage. Par suite, lorsque la vitesse de la machine dépasse la lne, la vapeur arrive en moins grande quantité, et, la force motrice , le mouvement se ralentit.

mpe alimentaire. — Il est nécessaire d'alimenter le générateur d'eau, que celle-ci se vaporise. Or c'est la machine à vapeur elle-même qui e de ce travail. Pour cela, on y ajoute une pompe Q, aspirante et dont la tige *g* reçoit son mouvement de va-et-vient d'un excentrique ur l'arbre de couche. Cette pompe, qu'on désigne sous le nom de *mentaire*, aspire l'eau d'un puits et la refoule par un tube de cuivre R nérateur.

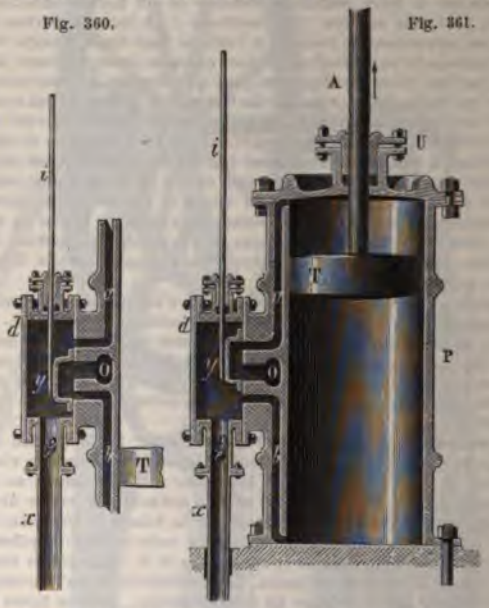
tribution de vapeur. — Pour compléter la description de la ma- peur, il reste à faire connaître la *distribution de vapeur*, c'est-à-dire me qui sert à faire passer la vapeur alternativement au-dessus et s du piston. Les figures 360 et 361 donnent une coupe de ce méca- vapeur arrivant du générateur par le tube *x* se rend dans une boîte i, qui est la *boîte à distribution*. De celle-ci, dans l'épaisseur même du cylindre, partent deux conduits *a* et *b*, dirigeant la vapeur, l'un l'autre au-dessous du piston. Une pièce mobile *y*, qu'on nomme la *glis- e tiroir*, ferme toujours un de ces conduits. Dans la figure 361, c'est supérieur *a* qui se trouve fermé, et la vapeur arrivant en dessous du ait monter.

ie tige *i*, qui reçoit d'un excentrique *e* (fig. 359) un s en haut et de haut en bas, en vertu duquel la glis- es positions représentées dans les figures 360 et 361. en dessous du piston (fig. 361), la partie supérieure

face du piston opposée à celle qui reçoit l'action de la vapeur. Toutefois, quoique une pompe spéciale renouvelle constamment l'eau du condenseur, la chaleur que lui cède la vapeur en se condensant la maintient toujours à près de 40 degrés, température à laquelle la tension de la vapeur dans le condenseur est bien inférieure à celle de la vapeur qui arrive du générateur (348).

La machine représentée dans la figure 359 est une *machine à haute pression, sans condenseur.* De plus, c'est une *machine à bielle articulée*, système dû

Fig. 360. Fig. 361.



à l'ingénieur anglais Maudslay. La machine de Watt, identique sous tous les autres rapports, est *à balancier;* c'est-à-dire que le mouvement de la tige du piston se transmet à l'extrémité d'un énorme balancier de fonte, mobile en son milieu sur deux tourillons, et c'est ensuite ce balancier qui, à son autre extrémité, communique le mouvement à la bielle, à la manivelle et à l'arbre de couche. L'emploi des machines à bielle articulée est aujourd'hui beaucoup plus répandu dans les ateliers, que celui des machines à balancier.

470. **Locomotives.** — On appelle *machines locomotives*, ou simplement *locomotives*, des machines à vapeur qui, montées sur un train de voiture, se déplacent elles-mêmes en transmettant le mouvement aux roues.

Les locomotives sont à bielle articulée; mais le volant des machines fixes est supprimé. La forme du générateur est aussi complétement modifiée. Les parties principales de ces machines sont le *châssis*, la *boîte à feu*, le *corps cylindrique* de la chaudière, la *boîte à fumée*, les *cylindres à vapeur* avec leurs tiroirs, les *roues motrices* et l'*alimentation.*

Le châssis est un cadre de bois de chêne porté par les essieux des roues et *soutenant* lui-même toutes les parties de la machine. Le dessin (fig. 362) re-

ente le mécanicien qui dirige la locomotive, monté sur la plate-forme de qui recouvre le châssis, au moment où il se dispose à ouvrir la *prise de* ur I, placée dans la partie supérieure de la boîte à feu Z. A la partie infé-e de celle-ci est le foyer, d'où la flamme et les produits de la combustion ndent dans la boîte à fumée Y, puis dans le tuyau de cheminée, après avoir rsé 125 tubes de cuivre, plongés dans l'eau de la chaudière.

chaudière, qui relie la boîte à feu à la boîte à fumée, est de cuivre rouge, rme cylindrique et d'un mètre de diamètre environ; elle est entourée de es d'acajou, qui, par leur faible conductibilité, s'opposent au refroidissement. ortant de la chaudière, la vapeur se rend dans deux cylindres placés de ue côté de la boîte à fumée. Là, au moyen d'une distribution analogue à décrite ci-dessus (469), elle agit alternativement sur les deux faces de ns dont les tiges transmettent le mouvement à l'essieu des grandes roues. distribution n'est pas visible dans le dessin, parce qu'elle est placée sous hâssis, entre les deux cylindres. Après avoir agi sur les pistons, la vapeur gage par le tuyau de la cheminé[illegible] tribue ainsi à activer le tirage.

transmission du mouvement des [illegible]ns aux deux grandes roues se fait leux bielles qui, au moyen de mani[illegible]. lient les tiges des pistons à l'essieu s roues. Quant au mouvement de [illegible] vient du tiroir, dans la boîte à dis-ticu de chaque cylindre, il s'ob[illegible] à l'aide d'excentriques placés sur eu des deux grandes roues.

alimentation, c'est-à-dire le renouv[illegible]ent de l'eau dans la chaudière, s'ob-au moyen de deux pompes aspir[illegible]t foulantes placées sous le châssis [illegible] par des excentriques. Ces pom[illegible] l'aide de tubes de communication, ent l'eau d'un réservoir placé su[illegible]*nder*. On nomme ainsi la voiture ent immédiatement la locomotive, [illegible] porte l'eau et le charbon néces-s à un parcours déterminé.

Légende explica[illegible] de la fig. 362.

Tuyau de cuivre rouge recevant l[illegible]apeur par l'extrémité I, et se bifurquant à l'autre extrémité pour la co[illegible]ire aux deux cylindres qui contiennent les pistons moteurs.

Poignée du levier de changement de marche. Elle transmet le mouvement à la tringle C, qui le communique à la distribution de vapeur.

Tringle du changement de marche.

Partie inférieure de la boîte à feu contenant les grilles du foyer.

Tuyau d'échappement de la vapeur après que celle-ci a agi sur les pistons.

Cylindre de fonte renfermant un piston moteur. De chaque côté de la locomotive il y en a un pareil. C'est afin de laisser apercevoir le piston qu'on a dessiné le cylindre entr'ouvert.

Tringle qui sert à ouvrir le tiroir I pour laisser passer la vapeur dans le tube A. Dans le dessin, le mécanicien tient à la main le levier qui fait tourner cette tringle.

Robinet de vidange de la chaudière.

Tiroir s'ouvrant et se fermant à la main pour la prise de vapeur.

Grande bielle motrice à fourchette réunissant la tête de la tige du piston à la manivelle M de la grande roue.

Lampe à réflecteur servant à indiquer, pendant la nuit, l'approche de la locomotive.

Manivelle qui transmet à l'essieu de la grande roue le mouvement du piston.

[illegible] d'attelage du tender qui suit la locomotive.

[illegible] du foyer par laquelle le chauffeur introduit le coke.

[illegible]a métallique dont la tige s'articule à la bielle K.

[illegible]au de tôle par lequel se dégage la fumée, ainsi que la vapeur qui [illegible]ort des cylindres.

Q
L
Z
X
X
Y
E
T
T
N
R
R
D
S
U

R Tuyaux conduisant l'eau du tender à deux pompes foulantes qui alimentent la chaudière, mais qui ne sont pas visibles dans le dessin.

Chasse-pierres destiné à écarter les pierres ou tout autre objet encombrant la voie.

T Ressorts qui supportent la chaudière.

U Rails de fer maintenus sur la voie par des coussinets de fonte fixés sur des traverses de bois.

Encadrement de la boîte à étoupe des cylindres.

X Corps de la chaudière, recouvert de douves d'acajou destinées à diminuer la perte de chaleur par leur faible conductibilité. On voit, au-dessous du tube A, jusqu'où s'élève le niveau de l'eau dans la chaudière. Au milieu même de l'eau sont des tubes de cuivre *a*, dans lesquels passent les produits de la combustion pour se rendre dans la boîte à fumée.

Boîte à fumée dans laquelle débouchent les tubes *a*.

Z Boîte à feu surmontée d'un dôme dans lequel se rend la vapeur.

Tubes de cuivre au nombre de 125, ouverts aux deux bouts, et se terminant d'une part à la boîte à feu, de l'autre à la boîte à fumée. Ce sont ces tubes qui transmettent la chaleur du foyer à l'eau de la chaudière et la vaporisent.

Secteur-guide placé sur le côté de la boîte à feu, et portant des crans dans lesquels peut engrener le bras de levier B. Le cran extrême d'avant correspond à la marche en avant, le cran extrême d'arrière à la marche en arrière; le cran du milieu est un point mort. Les crans intermédiaires entre celui-ci et les crans extrêmes donnent la détente pour la marche en avant ou en arrière (473).

Étais contenant des ressorts à boudin qui règlent le jeu des soupapes de sûreté *i*.

Sifflet d'alarme se faisant entendre à 2 000 mètres.

Soupapes de sûreté.

m Marchepieds pour monter sur le tablier de la locomotive.

Tube de cristal placé devant le mécanicien, et indiquant le niveau de l'eau dans la chaudière, avec laquelle il communique par ses deux bouts.

p Guides qui maintiennent rectiligne le mouvement de la tête du piston.

r Robinets de purge après la mise en train et l'échauffement des cylindres.

Tringle qui transmet le mouvement aux robinets de purge.

471. **Machines à réaction; éolipyle.** — On nomme *machines à réaction* machines dans lesquelles la vapeur agit par réaction, à la manière de l'eau de le tourniquet hydraulique (86). L'idée de ces machines est déjà bien ancienne : 120 ans avant J.-C., Héron, d'Alexandrie, le même qui inventa la fontaine qui porte son nom, a décrit l'appareil suivant, connu sous le nom d'*éolipyle* réaction.

C'est une sphère creuse de métal (fig. 363), pouvant tourner librement autour de deux tourillons. Aux extrémités d'un même diamètre sont deux tubulures percées latéralement et en sens contraires d'orifices par lesquels se dégage la vapeur. Pour introduire de l'eau dans la sphère, on la chauffe afin de raréfier l'air, puis on la plonge dans l'eau froide; l'air se contracte, et le liquide entre dans la boule. Si l'on chauffe alors l'appareil jusqu'à l'ébullition, la vapeur qui se dégage lui imprime un mouvement rapide de rotation, dû à la réaction de la vapeur sur la paroi opposée à l'orifice de sortie.

Plusieurs tentatives ont été faites dans le but d'utiliser en grand la réaction de la vapeur comme force motrice; on a aussi essayé de la faire agir par impulsion, en dirigeant un jet de vapeur sur la palette d'une roue tournante; mais dans ces différents procédés, la vapeur a toujours été loin de rendre l'effet utile qu'on obtient en la faisant agir par expansion sur un piston.

472. **Machines à basse, à haute et à moyenne pression.** — Une machine

est dite à *basse pression*, lorsque la tension de la vapeur ne dépasse pas 1 sphère et $\frac{1}{4}$; à *moyenne pression*, lorsque la tension de la vapeur est co entre 2 et 4 atmosphères; et à *haute pression*, quand la vapeur agit av tension supérieure à 4 atmosphères.

473. **Machines à détente et sans détente.** — Si la vapeur arrive e

Fig. 363 (h=18).

sur le piston, pendant toute la durée de sa course, sa force élastique re siblement la même, et l'on dit que la vapeur agit *sans détente;* mais si, disposition convenable du tiroir, la vapeur cesse d'arriver sur le piston, celui-ci est seulement aux deux tiers ou aux trois quarts de sa course, *se détend*, c'est-à-dire qu'en vertu de la force expansive due à sa hau pérature, elle agit encore sur le piston et achève de lui faire parc course. De là la distinction de *machines avec détente* et de *machines sans* La détente économise la vapeur et, par suite, le combustible.

Enfin, on appelle *machines à condensation* celles qui sont munies d denseur où la vapeur se liquéfie après qu'elle a agi sur le piston, et *sans condensation* celles qui n'ont pas de condenseur : telles sont les loco

474. **Cheval-vapeur.** — En mécanique appliquée, on entend par *tra canique* d'un moteur le produit de l'effort qu'il exerce par le chemin par cet effort, et l'on prend pour unité de travail mécanique le *kilogra* qui est le travail nécessaire pour élever 1 kilogramme à 1 mètre de hau 1 seconde (37).

Dans la mesure du travail des machines à vapeur, on prend pour *cheval-vapeur*, qui représente *le travail nécessaire pour élever 75 kilog à 1 mètre de hauteur en 1 seconde;* c'est-à-dire qu'il équivaut à 75 k mètres. Par conséquent, une machine de 40 chevaux est celle qui peu d'une manière continue, 40 fois 75 kilogrammes, ou 3 000 kilogrammes, de hauteur par seconde. Le travail d'un cheval-vapeur est à peu pri de celui d'un cheval de trait ordinaire.

On comptait en Angleterre, en 1866, 3 650 000 chevaux-vapeur.

mière, hypothèses sur sa nature. — La *lumière* est
produit en nous, par son action sur la rétine, le phé-
la vision. La partie de la physique qui fait connaître
de la lumière est désignée sous le nom d'*optique*.
pliquer l'origine de la lumière, on a adopté les mêmes
s que pour la chaleur : celle de l'*émission* et celle des
s. Dans cette dernière, seule admise aujourd'hui, et
uccessivement par Descartes, Grimaldi, Huyghens, Eu-
s Young, Malus et Fresnel, les molécules des corps lu-
nt animées d'un mouvement vibratoire infiniment ra-
e communique à l'éther (269). Dans cette hypothèse, un
nt en un point quelconque de l'éther se propage dans
ens sous la forme d'ondes sphériques lumineuses, de
le son est propagé dans l'air par les ondes sonores.
les vibrations de l'éther ne se produisent pas perpen-
ent à la surface de l'onde lumineuse, comme dans la
n du son, mais suivant cette surface même, c'est-à-dire
alairement à la direction que suit la lumière en se pro-
e qu'on exprime en disant que les vibrations sont *trans-*
ut se former une idée de ces vibrations en secouant
un bout : le mouvement se transmet en serpentant
bout ; la propagation se fait donc dans le sens de la
vibrations se font en travers. Or, l'éther pénétrant

cevoir de la lumière d'une source quelconque. Cette lum
ensuite renvoyée dans toutes les directions par un e
flexion (487), c'est elle qui nous les fait voir.

Les corps *diaphanes* ou *transparents* sont ceux qui
cilement passer la lumière, et au travers desquels on di
objets : tels sont l'eau, les gaz, le verre poli. Les *corp*
cides sont ceux au travers desquels on perçoit encore l
mais sans pouvoir reconnaître la forme des objets : tels s
dépoli, le papier huilé. Enfin, on appelle *corps opaqu*
travers desquels il n'y a pas transmission de lumière,
bois, les métaux. Toutefois il n'y a pas de corps con
opaques; tous sont plus ou moins translucides lorsqu'
duits en feuilles assez minces. Foucault a fait voir qu'en
sous une très-faible épaisseur, la surface extérieure d
de lunette, la couche d'argent est tellement transparent
serve très-bien le soleil au travers, observation qui
danger pour la vue, la plus grande partie de la chale
lumière solaire étant réfléchie par la couche d'argent

477. **Rayon et faisceau lumineux.** — Les mots *rayon*
faisceau *parallèle*, faisceau *divergent*, sont pris ici da
sens que dans la chaleur (415). De plus, on dit qu'un f
convergent quand les rayons concourent vers un même
faisceau très-délié se désigne sous le nom de *pinceau*.

[1] « Certains corps sont transparents, parce que l'éther et leur
entre eux dans des rapports tels, que les ondes qui produisent la

mbre noire par une petite ouverture trace dans l'air un
ineux rectiligne, qui devient visible en éclairant les pous-
gères en suspension dans l'atmosphère.
ois la lumière change de direction lorsqu'elle rencontre
cle qu'elle ne peut pénétrer, ou lorsqu'elle passe d'un mi-
s un autre; ces phénomènes seront décrits bientôt sous
de *réflexion* et de *réfraction* (487 et 512).
mbre, pénombre, reflet. — L'*ombre* d'un corps est le lieu

Fig. 364.

ce où il empêche la lumière de pénétrer. Pour détermi-
ndue et la forme de l'ombre projetée par un corps, on dis-
eux cas : celui où la source lumineuse est un point unique,
où elle est un corps d'une étendue quelconque.
e premier cas, soient S (fig. 364) le point lumineux, et M
qui porte ombre et que nous supposerons sphérique. Si
oit qu'une droite indéfinie SG se meuve autour de la sphère
i restant tangente et en passant constamment par le point
droite engendre une surface conique qui, au delà de la

droite indéfinie AG se meuve tangentiellement à ces sphères, en coupant constamment la ligne des centres au point A, elle engendre une surface conique qui a pour sommet ce point, et qui limite, derrière la sphère MN, un espace MGHN complétement privé de lumière. Si actuellement une seconde droite LD, coupant la ligne des centres en B, tourne encore tangentiellement aux deux sphères de manière à engendrer une nouvelle surface conique DBC, qui a son sommet en B, toute la partie extérieure à cette surface reste complétement dans la lumière. En effet, si l'on place un écran PQ au delà du corps opaque, tout point *o* de cet écran, en dehors de la surface DBC, peut être joint par une droite à tous les points

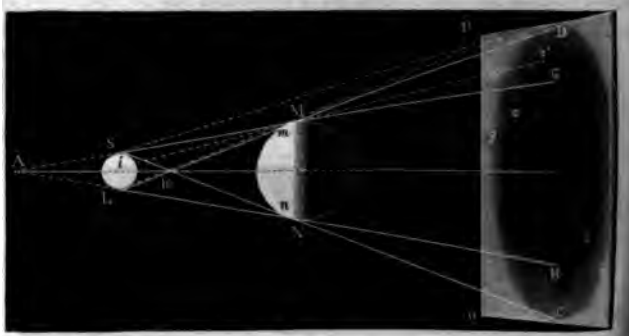


Fig. 365.

de SL sans interposition du corps opaque; mais tout point compris entre les deux surfaces coniques, ne peut recevoir de lumière que des points de SL situés au-dessus de *o'i*; donc le point *o'* est moins éclairé que le point *o*. Enfin, un point quelconque de la partie centrale *GaHb*, ne pouvant recevoir de lumière d'aucune partie du corps SL, est complétement dans l'ombre. La portion annulaire D*h*C*g*G*b*H*a*, plus éclairée que la partie centrale et moins éclairée que le reste de l'écran, se désigne sous le nom de *pénombre;* son éclat croît de G vers D.

Si l'on trace sur la sphère opaque deux cercles MN et *mn*, qui passent par les points de contact des tangentes AG et BD, on a une zone *mn*MN à laquelle aussi correspond une pénombre.

Les ombres telles qu'on vient de les construire sont les *ombres géométriques;* les *ombres physiques*, c'est-à-dire celles qu'on observe réellement, ne sont pas aussi bien limitées. On remarque, en effet, qu'une certaine quantité de lumière passe dans l'ombre, et que, réciproquement, de l'ombre se trouve dans la partie éclairée

Ce phénomène sera décrit plus tard sous le nom de *diffraction* (618).

Lorsqu'un corps opaque intercepte la lumière par une de ses faces, la face opposée n'est jamais complétement obscure; elle est toujours plus ou moins éclairée par la lumière que réfléchissent les corps voisins. C'est l'effet de cette réverbération qu'on nomme *reflet*. Or, la lumière réfléchie par un corps coloré participant de la couleur propre de ce corps, les reflets prennent eux-mêmes la teinte des objets environnants. Les peintres dans leurs tableaux, les décorateurs dans le choix des draperies, les femmes dans celui de leurs parures, utilisent avec art les effets de lumière que produisent les reflets.

480. **Images à travers les petites ouvertures.** — Lorsqu'on reçoit sur un écran les rayons lumineux qui pénètrent *par une petite*

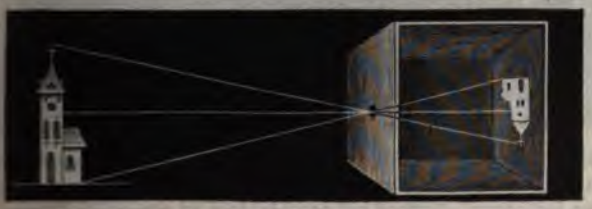


Fig. 366.

ouverture dans une chambre noire, on obtient, des objets extérieurs, des images qui présentent les phénomènes suivants : 1° *elles sont renversées*; 2° *leur forme est indépendante de la forme de l'ouverture.*

Le renversement des images résulte de ce que les rayons qui viennent des objets extérieurs et pénètrent dans la chambre noire, se croisent en passant dans l'ouverture, comme le montre la figure 366. Continuant à se propager en ligne droite, les rayons émis des points les plus élevés rencontrent l'écran aux points les plus bas, et, réciproquement, ceux qui viennent des points inférieurs rencontrent l'écran aux points les plus hauts. De là le renversement de l'image. A l'article *Chambre obscure* (576), on verra comment on augmente l'éclat et la netteté des images au moyen de verres convergents, et par quel procédé on les redresse.

Pour montrer comment la forme de l'image est indépendante de celle de l'ouverture, lorsque celle-ci est suffisamment petite et que l'écran est assez éloigné, soit une ouverture triangulaire O (fig. 367), pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et soit un écran *ab* sur lequel on reçoit l'image d'une flamme AB placée à l'extérieur. Chaque point de la flamme pénètre un faisceau divergent qui

vient former, sur l'écran, une image triangulaire semblable à l'ouverture, comme le montre le dessin. Or c'est la réunion de toutes ces images partielles qui produit une image totale de même forme que l'objet éclairant. En effet, si l'on conçoit qu'une droite indéfinie se meuve dans l'ouverture du volet, supposée très-petite, avec la condition que cette droite reste toujours tangente à l'objet lumineux AB, elle décrit, dans son mouvement, deux surfaces coniques ayant pour sommet commun l'ouverture même de la chambre noire, et pour base, l'une le corps lumineux, l'autre la partie

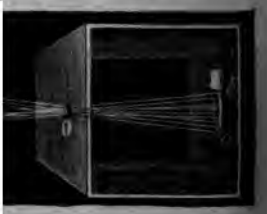


Fig. 367.

éclairée de l'écran, c'est-à-dire l'image. Si l'écran est perpendiculaire à la droite qui joint le centre de l'ouverture au centre du corps lumineux, l'image est semblable à ce corps; si l'écran est oblique, l'image est allongée dans le sens de l'obliquité. C'est ce qu'on observe dans l'ombre portée par le feuillage des arbres: les faisceaux lumineux qui passent à travers les feuilles donnent des images du soleil, qui sont rondes ou elliptiques, suivant que la surface sur laquelle elles se projettent est perpendiculaire ou oblique aux rayons solaires, et cela, quelle que soit, entre les feuilles, la forme des intervalles à travers lesquels passe la lumière.

481. **Vitesse de la lumière.** — La lumière se propage avec une vitesse telle, qu'on ne peut, à la surface de la terre, constater un intervalle appréciable, quelle que soit la distance, entre l'instant où un phénomène lumineux se produit et celui où l'œil le perçoit; aussi est-ce au moyen d'observations astronomiques que cette vitesse a d'abord été déterminée. C'est Rœmer, astronome danois, qui, le premier, en 1675, déduisit la vitesse de la lumière de l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter.

On sait que Jupiter est une planète autour de laquelle tourne avec rapidité quatre satellites, de la même manière que la lune tourne autour de la terre. Son premier satellite (le plus rapproché de la planète) fait ses immersions, c'est-à-dire entre dans l'ombre projetée par Jupiter, à des intervalles de temps égaux, qui sont de $42^h\ 28^m\ 36^s$. Il y a donc périodiquement éclipse du satellite

de ces intervalles. Or, avant Rœmer, Dominique Cassini avait truit des tables qui, basées sur un très-grand nombre d'obser- ns, devaient servir à prédire les éclipses des satellites de Ju- . Mais, en faisant usage de ces tables, Rœmer observa que indications étaient, tantôt en avance, tantôt en retard sur clipses. Quand Jupiter était en opposition, c'est-à-dire lorsque re était entre cette planète et le soleil, il y avait avance; et au

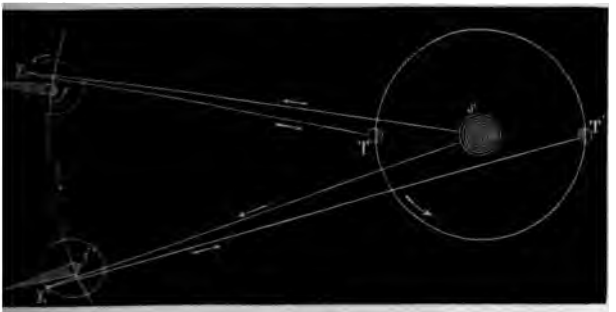


Fig. 368.

aire, au moment des conjonctions, c'est-à-dire quand le soleil entre la terre et Jupiter, il y avait retard. C'est cette observation conduisit Rœmer à la découverte de la vitesse de la lumière. effet, à l'opposition et dans les positions voisines, le soleil en *s* (fig. 368), la terre en T, et Jupiter en *j*, la distance de la à Jupiter, et, par suite, à son satellite E, est sensiblement Ts, c'est-à-dire la différence entre la distance du soleil à Ju- et celle de la terre au soleil; tandis qu'aux conjonctions, par ple quand la terre est en T' et Jupiter en *j'*, la distance de la à Jupiter est sensiblement $sj' + T's$. La distance $T'j'$ surpas- Tj de deux fois la distance de la terre au soleil, la lumière e réfléchie par le satellite E vers la terre a à parcourir dans ond cas un chemin plus grand que dans le premier de deux T; de là la cause du retard observé par Rœmer.

r évaluer ce retard, concevons qu'on observe une éclipse du lite E, c'est-à-dire l'instant de son immersion dans le cône bre projetée par Jupiter, lorsque cette planète est en *j* et la terre puis une seconde éclipse quand ces deux astres sont en *j'* T', c'est-à-dire lorsque la distance de la terre à Jupiter est entée de tout le diamètre de l'orbite terrestre. Or, au lieu de er que le temps écoulé entre ces deux observations soit un ple de $42^h\ 28^m\ 36^s$ par le nombre d'éclipses qui s'est produit

pendant le passage de la terre de T en T', on trouve un int plus grand de 16 minutes 26 secondes. C'est donc pour parco distance TT', c'est-à-dire deux fois celle de la terre au soleï a fallu à la lumière 16 minutes 26 secondes. D'où l'on concl pour parcourir la distance de la terre au soleil, la lumière e 8 minutes 13 secondes; ce qui, d'après cette distance, rep une vitesse, par seconde, de 308 000 kilomètres.

Cette vitesse est celle trouvée par Struve par l'observa l'aberration des étoiles fixes; la vitesse trouvée par Rœm un peu plus grande.

Les étoiles les plus rapprochées de la terre sont au moins fois plus éloignées que le soleil. La lumière qu'elles nous e met donc plus de trois années et un quart pour arriver nous. Quant aux étoiles qui ne sont visibles qu'à l'aide d cope, elles sont à une distance telle de la terre, qu'il f milliers d'années pour que leur lumière nous arrive. Ce seraient donc éteints depuis des siècles, que nous continu les contempler et à étudier leur mouvement.

* 482. **Expérience de Foucault pour mesurer la vitesse de la lu** Malgré l'extrême vitesse de la lumière, Foucault est parvenu à la déterm rimentalement à l'aide d'un appareil fondé sur l'emploi du miroir tourn adopté par M. Wheatstone pour mesurer la vitesse de l'électricité.

Avant de décrire cet appareil, il importe d'observer que ce qui suit connues les propriétés des miroirs et des lentilles, données plus loin a graphes 497 et 530. La figure 369 représente, en plan horizontal, les p dispositions de l'appareil de Foucault. Le volet K d'une chambre obscure d'une ouverture carrée, derrière laquelle est tendu verticalement un fi tine *o*. Un faisceau de lumière solaire, réfléchi extérieurement sur u pénètre dans la chambre obscure par l'ouverture carrée, rencontre le fil de et de là se dirige sur une lentille achromatique L, à long foyer, placée à tance du fil de platine moindre que le double de la distance focale p L'image du fil de platine tend alors à aller se former sur l'axe de la lent des dimensions plus ou moins amplifiées. Mais le faisceau lumineux, ap traversé la lentille, rencontre un miroir plan *m*, tournant avec une grand sur lequel il se réfléchit et va former, dans l'espace, une image du fil de pl se déplace avec une vitesse angulaire double de celle du miroir[1]. Cette i réfléchie par un miroir M concave et fixe, dont le centre de courbure avec l'axe de rotation du miroir tournant *m* et avec son centre de figure ceau réfléchi sur le miroir M revient sur lui-même, se réfléchit de nouve miroir *m*, traverse une seconde fois la lentille, et vient former une im de platine qui paraît sur ce fil même tant que le miroir *m* tourne lenten

Pour voir cette image sans masquer le faisceau qui entre par l'ouvert place une glace de verre V, à faces parallèles, entre la lentille et le fil de

1. Pour le démontrer, soient *mn* (fig. 370) le miroir tournant, O un objet fixe placé et formant son image en O'. Quand le miroir arrive dans la position *m'n'*, l'image se Or les deux angles O'OO'' et *mcm'* sont égaux, comme ayant les côtés perpendiculaires chacun; mais l'angle inscrit O'OO'' n'a pour mesure que la moitié de l'arc O'O'', tandis au centre *mcm'* a pour mesure l'arc *mm'* tout entier. Donc l'arc O'O'' est double de m démontre que la vitesse angulaire de l'image est double de celle du miroir.

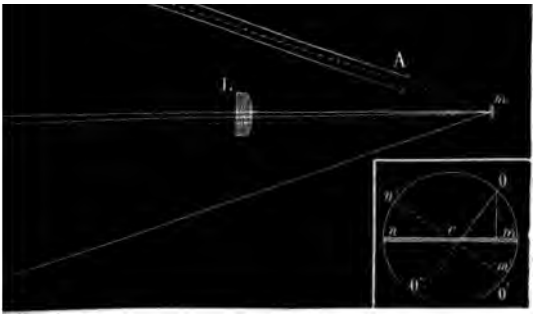


Fig. 369. Fig. 370.

it reparaître cette image à chaque révolution, et si sa vitesse de ro-
orme, l'image reste immobile dans l'espace. Pour des vitesses qui
ns 30 tours par seconde, les apparitions successives sont distinctes;
le 30 tours, il y a persistance des impressions dans l'œil, et l'image
ument calme.

miroir *m* tourne suffisamment vite, il a changé sensiblement de po-
temps que la lumière met à faire le double parcours de *m* en M et
rayon de retour, après sa réflexion sur le miroir *m*, prend alors
b et vient former son image en *i*; c'est-à-dire que l'image a éprouvé
totale *di*. Rigoureusement parlant, il y a déviation aussitôt que le
même lentement; mais elle n'est appréciable que lorsqu'elle acquiert
grandeur, ce qui exige une vitesse de rotation assez rapide ou une
suffisamment grande; car la déviation croît nécessairement comme
la lumière met à revenir sur elle-même.

sivement adopté; car on verra (526) que l'eau est plus réfringe

Quant au mécanisme dont s'est servi Foucault pour imprimer u tesse au miroir tournant, il consiste en une petite turbine à vapeur rapport avec la sirène, et rendant, comme elle, un son d'autant pl rotation est plus rapide; c'est même d'après la hauteur du son qu reil qu'on apprécie sa vitesse de rotation.

* 483. **Expérience de Fizeau.** — M. Fizeau, en 1849, a mesu la vitesse de la lumière, en cherchant le temps qu'il lui fallait po de Suresnes à Montmartre, puis pour revenir de Montmartre à Su reil employé par ce savant consistait en une roue dentée, tournan moins de vitesse, et dont l'intervalle entre les dents était rigour à leur épaisseur. Cette roue et le mécanisme qui la faisait march resnes, un faisceau de lumière parallèle passait entre deux dents, fléchir sur un miroir placé à Montmartre. Là, le faisceau dirigé de tubes et de lentilles revenait vers la roue. Tant que celle-ci le faisceau repassait exactement entre les mêmes dents qu'à son d roue tournant suffisamment vite, une dent prenait la place d'un i faisceau, que l'observateur recevait à travers un oculaire, était tournant plus vite, il reparaissait quand l'intervalle entre les d vantes avait pris la place du premier au moment du retour du

D'après la dimension de la roue, sa vitesse de rotation, sa dist réfléchissant, distance qui était de 8 633 mètres, M. Fizeau a trouv de la lumière est de 312 000 kilomètres, nombre plus grand q par l'observation des phénomènes astronomiques.

M. Cornu, qui a cherché récemment la vitesse de la lumière p de la roue dentée de M. Fizeau, a trouvé 298 400 kilomètres, n fère très-peu de celui de Foucault. Les deux stations, distantes de étaient l'une un pavillon de l'École polytechnique, l'autre une des casernes du Mont-Valérien.

484. **Lois de l'intensité de la lumière.**— En prenant *sité* d'une lumière la quantité reçue sur l'unité de s

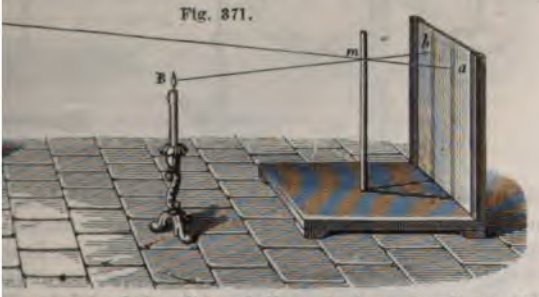
les 1re et 3e lois correspondantes pour la chaleur (417), ınt une source de lumière à la source de chaleur (fig. De plus, la loi du cosinus s'applique aussi aux rayons ement par une surface lumineuse, dont les rayons t moins intenses, qu'ils sont plus inclinés sur la sur- émet (2e *loi de la chaleur*).

rergence des rayons lumineux émis d'une même source l'intensité de la lumière est en raison inverse du listance. Pour des rayons lumineux parallèles, l'in- constante, dans le vide du moins; car dans l'air et tres milieux transparents, l'intensité de la lumière ın effet d'absorption (556), mais beaucoup plus lente- carré de la distance n'augmente.

r ci-après (486) comment la première loi de l'inten- ımière se vérifie au moyen du photomètre.

omètres. — On nomme *photomètres* des appareils

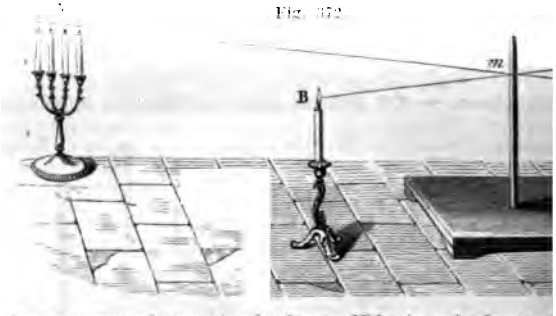
Fig. 371.



mparer les intensités relatives de deux lumières. On é un grand nombre; mais tous laissent à désirer sous e la précision.

décrirons que le photomètre de Rumford; il se com- cran de verre dépoli devant lequel est fixée une tige ig. 371). A une certaine distance sont placées les lu- n veut comparer, par exemple une lampe et une bou- ière que chacune projette sur l'écran une ombre de la ıbres ainsi projetées sont d'abord d'inégale intensité; culant la lampe, ou en l'approchant peu à peu, on ob- sition où l'intensité des deux ombres *a* et *b* est la qui indique que l'écran est également éclairé par les es. Alors *les intensités de ces deux lumières sont di- roportionnelles aux carrés de leurs distances aux om- es;* c'est-à-dire que si la lampe est, par exemple, 3 fois

Fig. 372.



rience comme le montre la figure 372. Ayant placé u
une certaine distance B*b* de l'écran du photomètre,
quatre bougies, identiques avec la première, en ligne
la tige *m*, puis on les écarte jusqu'à ce que les deux
b portées sur l'écran apparaissent de même teinte. Or,
sure alors la distance moyenne A*a* des quatre bougie
on trouve qu'elle est double de B*b*. Ce qui vérifie la l
quatre bougies, à une distance de 2 mètres par exempl
comme une seule à une distance de 1 mètre. On vérif
que neuf bougies à une distance de 3 mètres, éclai
comme une seule à la distance de 1 mètre.

ngle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.
rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même
rpendiculaire à la surface réfléchissante.
ots *rayon incident, rayon réfléchi, angle d'incidence,*
réflexion, étant pris ici dans le même sens qu'au para-
21, nous n'avons pas à les définir de nouveau.
nonstration.— Les deux lois ci-dessus se démontrent ex-
ialement au moyen
reil représenté dans
373. Il consiste en
de cuivre gradué,
verticalement sur
ds à vis calantes.
le zéro de la gra-
qui est tracée à droi-
nche jusqu'à 90 de-
x alidades de cuivre
tournent librement
urillon central der-
ercle. Elles portent
its tubes *i* et *c* diri-
ireusement vers le
et destinés à livrer
respectivement aux
ncident et réfléchi.
dade I est en outre
miroir M qu'on in-
rolonté.
tails connus, ayant
ns ou moins l'alidade

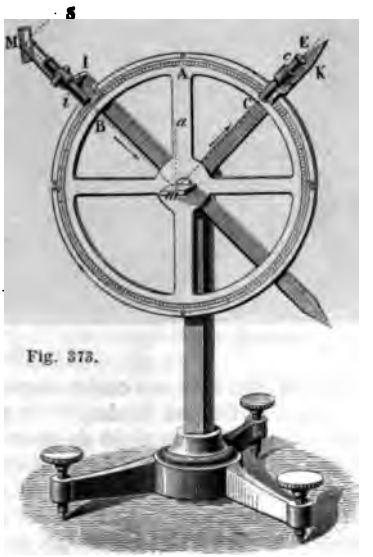


Fig. 373.

de la graduation, on incline le miroir M de manière qu'un
mineux S, après s'être réfléchi sur ce miroir, aille passer
ube *i*, et tomber sur un second miroir *m* disposé horizonta-
u centre et en avant du cercle; là, le rayon se réfléchit une
fois pour prendre la direction *m*E. Posant alors la main sur
K, on l'écarte ou on l'approche du point A jusqu'à ce que,
'œil en E, on reçoive à travers le tube *c* le rayon réfléchi
si on lit actuellement sur le cercle gradué les nombres
s que contiennent les arcs AB et AC, on trouve qu'ils
ux. Donc il en est de même des angles d'incidence et de
. B*ma* et *am*C mesurés par ces arcs; ce qui vérifie la
loi.
uxième loi se trouve également vérifiée; en effet, dans

Fig. 374.

gradué M (fig. 374), au centre duquel est une lunette m
un plan parallèle au limbe; et on place, à une distan
nable, un petit vase plein de mercure, destiné à pré
miroir plan parfaitement horizontal. Cela fait, on regar
lunette, suivant une direction AE, une étoile remarq
première ou de deuxième grandeur; puis on incline la
manière à recevoir un rayon AD, venant de la même été
qu'il s'est réfléchi en D sur la surface brillante du merc
trouve ainsi que les deux angles formés par les rayons I
avec l'horizontale AH, sont égaux; d'où il est facile de
que l'angle d'incidence E'DE est égal à l'angle de réfle
En effet, DE étant la normale à la surface du mercure, c
est perpendiculaire à AH, le triangle AED est isocèle,
gles ADE et AED sont égaux; mais les deux rayons lum

ate. Celle-ci, lorsque le corps réfléchissant est opaque, se par- en deux parties : l'une qui est réfléchie régulièrement, l'autre *gulièrement*, c'est-à-dire dans toutes les directions (423).

ı lumière réfléchie irrégulièrement se désigne sous le nom de *ière diffuse;* c'est elle qui nous fait voir les corps. En effet, la ière réfléchie régulièrement ne donne pas l'image du corps la réfléchit, mais bien celle du corps qui l'émet. Par exemple, n reçoit dans une chambre obscure un faisceau de lumière re sur un miroir bien poli, plus celui-ci réfléchit réguliè- nt la lumière, moins il est visible des diverses parties de einte. L'œil qui reçoit alors le faisceau réfléchi ne voit pas le ir, mais seulement l'image du soleil. Qu'on affaiblisse le oir réflecteur du miroir en projetant dessus une poussière e, la lumière diffuse augmente, l'image solaire s'affaiblit, miroir devient visible de toutes les parties de l'enceinte.

9. **Intensité de la lumière réfléchie.** — Pour un même corps, nsité de la lumière réfléchie régulièrement augmente avec le é de poli et avec l'angle que les rayons incidents font avec la nale à la surface réfléchissante. Par exemple, si l'on regarde obliquement une feuille de papier blanc placée devant une rie, on aperçoit, par réflexion, une image de la flamme, ce n'a pas lieu pour des rayons moins obliques.

eur des corps de nature différente, polis avec le même soin, gle d'incidence étant le même, l'intensité varie avec la sub- ce; elle varie encore avec le milieu dans lequel est plongé le s réfléchissant. Par exemple, le verre poli, plongé dans l'eau, l une grande partie de son pouvoir réfléchissant.

RÉFLEXION PAR LES SURFACES PLANES

90. **Miroirs, images.** — On nomme *miroir* tout corps dont la ce parfaitement polie réfléchit régulièrement la lumière en nnant l'image des objets qu'on lui présente. Suivant leur e, on divise les miroirs en *miroirs plans, concaves, convexes, riques, paraboliques, coniques*, etc.

91. **Formation des images dans les miroirs plans.** — La déter- tion de la position et de la grandeur des images se réduisant recherche des images d'une suite de points, soit d'abord un t unique A, lumineux ou éclairé, placé devant un miroir plan (fig. 375). Tout rayon AB, parti de ce point et rencontrant le ir, se réfléchit suivant la direction BO, en faisant l'angle de xion DBO égal à l'angle d'incidence ABD. Si l'on abaisse du t A une perpendiculaire AN sur le miroir, et si, au-dessous de

celui-ci, on prolonge le rayon OB jusqu'à ce qu'il rencontre cette perpendiculaire en un point *a*, on forme deux triangles ABN et BN*a*, qui sont égaux, comme ayant un côté commun BN compris entre deux angles égaux, savoir : les angles ANB et BN*a*, qui sont droits, et les angles ABN et NB*a*, qui sont égaux entre eux, comme

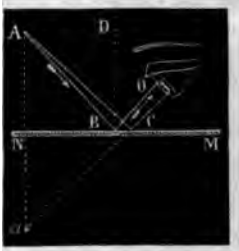


Fig. 375.

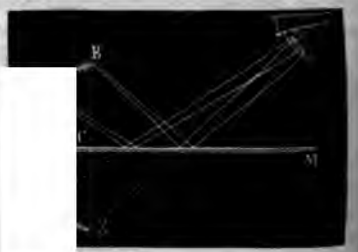


Fig. 376.

l'étant tous deux à l'angle OBM. De l'égalité de ces triangles il résulte que *a*N est égal à AN, c'est-à-dire qu'un rayon quelconque AB prend, après la réflexion, une direction telle, que son prolongement au-dessous du miroir vient couper la perpendiculaire AN en un point *a* situé précisément à la même distance du miroir que le point A lui-même. Cette propriété, n'étant pas particulière au rayon AB, s'applique à tout autre rayon AC parti du point A. On tire de là cette conséquence importante, que tous les rayons émis par le point A, et réfléchis sur le miroir, *suivent, après la réflexion, la même direction que s'ils étaient tous partis du point a*. Or *l'œil voyant toujours les objets dans la direction des rayons lumineux qu'il perçoit*, l'image du point A lui apparaît en *a* comme si ce point y était réellement. Donc, dans les miroirs plans, *l'image d'un point se fait derrière le miroir, à une distance égale à celle du point donné, et sur la perpendiculaire abaissée de ce point sur le miroir.*

Il est évident qu'on obtiendra l'image d'un objet quelconque en construisant, d'après la règle ci-dessus, l'image de chacun de ses points, ou du moins de ceux qui suffisent pour en déterminer la position et la forme. La figure 376 montre comment se produit, d'après ce principe, l'image *ab* d'un objet quelconque AB.

De cette construction on déduit que, dans les miroirs plans, *l'image est de même grandeur que l'objet;* car, si l'on superpose le trapèze ABCD sur le trapèze CD*ab*, on voit facilement qu'ils coïncident et que l'objet AB se confond avec son image.

Il découle encore de la construction ci-dessus que, dans les

plans, l'image est *symétrique* de l'objet, et non *renversée*, achant au mot symétrique le même sens qu'en géométrie, ux points sont symétriques par rapport à un plan lorsqu'ils itués sur une même perpendiculaire à ce plan et à une dis-gale, l'un d'un côté du plan, l'autre de l'autre côté : condi-auxquelles satisfont successivement tous les points de l'ob-et de son image *ab* dans la figure 376.

Images virtuelles et images réelles. — Il y a à distinguer ns relativement à la direction des rayons réfléchis par les s, selon qu'après la réflexion ces rayons sont divergents ou gents. Dans le premier cas, les rayons réfléchis ne se ren-nt pas; mais si on les conçoit prolongés de l'autre côté du , leurs prolongements concourent en un même point (fig. 376). L'œil, impressionné alors comme si les rayons étaient de ce point, y voit une image. Or celle-ci n'existe pas réelle-puisque les rayons lumineux ne passent pas de l'autre côté oir; elle n'est donc qu'une illusion de l'œil; c'est pourquoi donne le nom d'*image virtuelle*, c'est-à-dire qui tend à se ire, mais qui en réalité ne se produit pas. Telles sont tou-les images données par les miroirs plans.

s le second cas, où les rayons réfléchis sont convergents, e on en verra bientôt un exemple dans les miroirs concaves, gons vont concourir vers un point situé en avant du miroir même côté que l'objet. Là ils forment une image à laquelle nne le nom d'*image réelle*, pour exprimer qu'elle existe ment; car elle peut être reçue sur un écran et agir chimi-nt sur certaines substances. En résumé, on peut donc dire *s images réelles sont celles qui sont formées par les rayons ls eux-mêmes, et les images virtuelles celles qui sont es par leurs prolongements.*

Images multiples dans les miroirs de verre. — Les miroirs liques, qui n'ont qu'une seule surface réfléchissante, ne pro-t qu'une seule image; mais il n'en est plus ainsi des mi-le verre. Ceux-ci donnent naissance à plusieurs images, observe facilement lorsqu'on regarde obliquement dans nce l'image d'une bougie. On voit une première image peu e, puis une deuxième très-apparente, et derrière celle-ci urs autres dont l'intensité décroît successivement jusqu'à ir nulle.

phénomène s'explique par les deux surfaces réfléchissantes résentent les miroirs de verre. Lorsque les rayons partis du A (fig. 377) rencontrent la première surface, une partie est ie et donne du point A une première image *a*, formée par

le prolongement des rayons *b*E réfléchis par cette surface; l'autre partie pénètre dans le verre, se réfléchit en *c* sur la couche de tain qui recouvre la face postérieure du miroir, et revient à l'œil suivant le rayon *d*H, en donnant l'image *a'*. Celle-ci, distante de la première du double de l'épaisseur du miroir, est plus intense qu'elle, la couche métallique qui recouvre la seconde face du miroir réfléchissant mieux que le verre.

Fig. 377.

Quant aux autres images qui se produisent, elles résultent de ce fait général, que toutes les fois qu'un faisceau de lumière se présente pour passer d'un milieu dans un autre, par exemple de l'air dans le verre ou du verre dans l'air, jamais tout le faisceau ne passe, mais seulement une partie, l'autre étant réfléchie par la surface qui sépare les deux milieux. Par suite, lorsque le faisceau ed, réfléchi sur la couche de tain, se présente pour sortir du verre en *d*, une partie se réfléchit intérieurement sur la face MN, et revient vers la couche de tain, qui la renvoie de nouveau vers la face supérieure. Là, une portion sort et donne une troisième image, tandis que l'autre portion, revenant vers la couche de tain, s'y réfléchit, et, sortant en partie du verre par la face MN, donne une quatrième image; et ainsi de suite jusqu'à ce que, la lumière s'affaiblissant graduellement, les images cessent d'être visibles.

494. **Images multiples sur deux miroirs plans inclinés.** — Lorsqu'un objet est placé entre deux miroirs formant entre eux un angle droit ou aigu, il se produit de cet objet des images dont le nombre augmente avec l'inclinaison des miroirs. S'ils sont d'abord perpendiculaires l'un à l'autre, on aperçoit trois images disposées comme le montre la figure 378, O étant le point lumineux. Les rayons OC et OD, partis de ce point, donnent, après une seule réflexion, l'un l'image O', l'autre l'image O''; et le rayon OA, qui a subi deux réflexions, en A et en B, donne la troisième image O'''.

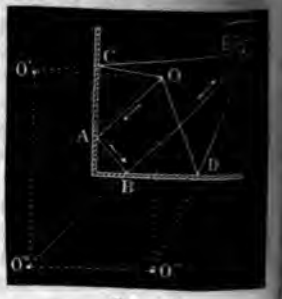


Fig. 378.

Si l'angle des miroirs est de 60 degrés, il se forme cinq images; s'il est de 45 degrés, il s'en produit sept. Le nombre des images continue ainsi à croître à mesure que l'angle des miroirs diminue, ce qui provient de ce que les rayons lumineux subis-

essivement d'un miroir à l'autre un nombre de réflexions

.

ur la propriété des miroirs inclinés qu'est fondé le *kaléi-* appareil formé d'un tube de carton dans lequel sont deux nclinés de 45 degrés, ou trois miroirs inclinés de 60. Des s-irréguliers, comme de la mousse, de la dentelle, étant une extrémité, entre deux disques de verre, dont l'exté- dépoli, lorsqu'on regarde par l'autre extrémité, on aper- bjets et leurs images symétriquement disposés, ce qui ensemble très-varié et souvent très-agréable.

nages multiples sur deux miroirs parallèles. — Dans le ux miroirs parallèles, le nombre des images qui se pro- duisent des objets placés entre eux est théoriquement infini. Physiquement, ce nombre est limité, parce que la lumière incidente ne se réfléchissant jamais en to-

Fig. 379.

talité, les images perdent de plus en plus de leur éclat, et finissent par s'éteindre tout à fait.

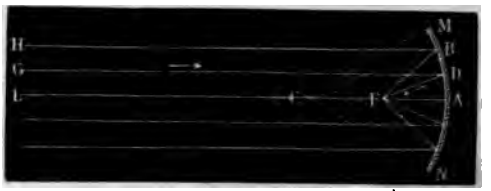
re 379 montre comment le faisceau L*a*, réfléchi une fois roir M, donne en I l'image de l'objet L, à une distance ; puis le faisceau L*b*, réfléchi une fois sur le miroir M s sur le miroir N, fournit l'image I' à une distance *n*I' même le faisceau L*c*, après deux réflexions sur M et une orme l'image I'' à une distance *m*I''=*m*I'; et ainsi de qu'à l'infini. Quant aux images *i*, *i'*, *i''*, elles sont for- la même manière par les rayons de lumière qui, partis L, tombent d'abord sur le miroir N.

RÉFLEXION PAR LES SURFACES COURBES

iroirs sphériques. — On a déjà vu (490) qu'on distingue sortes de miroirs courbes; les plus fréquemment em- nt les miroirs sphériques et les miroirs paraboliques.

On appelle *miroirs sphériques* ceux dont la courbure est d'une sphère; on peut supposer leur surface engendrée par l volution d'un arc AN autour du rayon CA qui joint l'extrémi l'arc à son centre (fig. 380). Suivant que la réflexion s'opère s face interne ou externe du miroir, il est dit *concave* ou *con* Le centre C de la sphère creuse dont le miroir fait partie e

Fig. 380.



centre de courbure, ou le *centre géométrique;* le point A *centre de figure*. La droite indéfinie AL, menée par les cent et C, est l'*axe principal* du miroir; toute droite qui passe p centre C, sans passer par le point A, est un *axe secondaire*

On nomme *section principale* d'un miroir celle qu'on ob en le coupant par un plan qui passe par l'axe principal. tout ce qui suit sur les miroirs, on ne considérera que des l situées dans une même section principale. Enfin, l'*ouverture* miroir est l'angle MCN formé en joignant le centre aux deux trémités de l'arc MN.

La théorie de la réflexion de la lumière sur les miroirs co se déduit très-simplement des lois de la réflexion sur les mi plans, en considérant la surface des premiers comme formée d infinité de surfaces planes infiniment petites qui en sont les *ments*. La *normale* à la surface courbe, en un point donné, est la perpendiculaire à l'élément correspondant, ou, ce qui e même chose, au plan tangent qui le contient. Or on démontre géométrie, que, dans la sphère, la perpendiculaire au plan tan menée par le point de contact passe par le centre; d'où la nor à tout miroir sphérique, en un point quelconque, s'obtien joignant ce point au centre de courbure par une droite.

497. **Foyers des miroirs sphériques concaves.** — Dans les mi courbes, on nomme *foyers* des points où vont concourir les ra réfléchis ou leurs prolongements; de là deux sortes de foyers *foyers réels* et les *foyers virtuels* (492). Dans les miroirs conc que nous allons d'abord étudier, on rencontre ces deux sort foyers; de plus, les foyers se subdivisent en *foyers principa* en *foyers conjugués*.

1° *Foyer principal.* — Le caractère distinctif du foyer pr

est d'être à position fixe, à égale distance du centre de cour-
e et du centre de figure, tandis que la position du foyer con-
é est variable. Pour obtenir d'abord le foyer principal, soit un
ceau de rayons parallèles à l'axe principal, ce qui suppose le
e éclairant placé à une distance infinie, et soit GD un de ces
ons (fig. 380). D'après l'hypothèse ci-dessus, que les miroirs
rbes sont formés d'une suite d'éléments plans infiniment petits,
ayon se réfléchit, sur l'élément qui correspond au point D,
n les lois de la réflexion sur les miroirs plans (487); c'est-à-
que, CD étant la normale au point d'incidence D, l'angle de
exion CDF est égal à l'angle d'incidence GDC et dans la même
ion principale. Par suite, dans le triangle DFC, les côtés DF
F sont égaux, comme opposés à des angles égaux; car les
les DCF et FDC sont tous deux égaux à l'angle CDG, le pre-
r comme alterne-interne, le second d'après les lois de la ré-
ion. D'ailleurs, FD approche d'autant plus d'égaler FA, que
e AD est plus petit. Donc, lorsque cet arc n'est que d'un petit
bre de degrés, on peut admettre très-approximativement
les droites AF *et* FC *sont égales, et que le point* F *est le mi-*
de AC.

tant que l'ouverture MCN du miroir ne dépasse pas 8 à 9 de-
s, tout autre rayon HB, parallèle à l'axe, vient ainsi, après la
exion, passer très-approximativement par le point F. Donc,
squ'un faisceau parallèle à l'axe tombe sur un miroir concave,
s les rayons vont sensiblement, après la réflexion, concourir
un même point situé à égale distance du centre de courbure et
miroir. Ce point est le *foyer principal*, et la distance FA du
t au miroir est la *distance focale principale*.

éciproque. — Tous les rayons parallèles à l'axe allant concou-
en F, il importe de remarquer que, réciproquement, si l'on
pose en F un point lumineux, les rayons émis de ce point
nent, après la réflexion, des directions DG, BH..., parallèles
xe principal : en effet, les angles de réflexion sont alors chan-
en angles d'incidence, et ceux d'incidence en angles de ré-
ion, mais ces angles restent toujours égaux. Donc, un point
ineux étant placé au foyer principal d'un miroir concave, *les*
ons partis de ce point, qui tombent sur le miroir, donnent,
s la réflexion, un faisceau sensiblement parallèle à l'axe.

Foyer conjugué. — Soit maintenant le cas où les rayons lu-
eux qui tombent sur le miroir sont émis d'un point L (fig. 381,
sur l'axe, au delà du foyer principal, à une distance telle.
les rayons incidents ne soient plus parallèles, mais divergents.
ayon incident LK faisant alors avec la normale CK un angle

d'incidence LKC, plus petit que l'angle SKC que fait avec la même normale le rayon SK parallèle à l'axe, l'angle de réflexion correspondant au rayon LK devra aussi être plus petit que l'angle CKF correspondant au rayon SK. Le rayon LK devra donc, après la réflexion, rencontrer l'axe en un point *l* situé plus près du centre C que le foyer principal F. Tant que l'ouverture du miroir ne dépasse pas un petit nombre de degrés, tous les rayons émis de L viennent, après la réflexion, concourir très-sensiblement au même point *l*. Ce point est appelé *foyer conjugué* du point L, pour indiquer la liaison entre les points L et *l*, liaison telle, qu'ils sont réciproques l'un de l'autre, c'est-à-dire que, si le point lumineux était trans-

Fig. 381.

porté en *l*, son foyer conjugué le serait en L, *l*K devenant le rayon incident, et KL le rayon réfléchi.

Pour démontrer que les rayons partis du point L et réfléchis sur le miroir vont très-approximativement concourir en *l*, observons que dans le triangle LK*l*, la droite CK étant la bissectrice de l'angle K, on a, d'après un théorème connu de géométrie, $\frac{LK}{Kl} = \frac{LC}{Cl}$ [1]. D'ailleurs, l'ouverture du miroir étant supposée d'un petit nombre de degrés, LK est sensiblement égal à LA, et *l*K à *l*A. L'égalité [1] peut donc être remplacée par $\frac{LA}{lA} = \frac{LC}{Cl}$, et cette dernière peut prendre la forme $\frac{LA}{LC} = \frac{lA}{Cl}$ [2]. Or l'égalité [2] subsiste pour tous les rayons partis du point L, et le rapport $\frac{LA}{LC}$ est constant tant que la distance LA est la même. Donc, pour les rayons émis du même point L, le rapport $\frac{lA}{Cl}$ est lui-même constant; ce qui ne peut se réaliser qu'à la condition que tous les rayons réfléchis aillent concourir en *l*. En effet, pour tout rayon qui rencontrerait l'axe plus loin ou plus près du centre que le point *l*, les deux termes *l*A et C*l* variant en sens contraire, le rapport $\frac{lA}{Cl}$ ne serait pas constant.

A l'inspection de la figure 381, on reconnaît facilement que lorsque l'objet L s'approche ou s'éloigne du centre C, son foyer conjugué s'en approche ou s'en éloigne avec lui; car les angles d'incidence et de réflexion croissent ou décroissent ensemble.

t L vient à coïncider avec le centre C, l'angle d'incidence t comme il en doit être de même de l'angle de réflexion, éfléchi revient sur lui-même, et le foyer coïncide avec rsque l'objet lumineux passe au delà du centre C, entre le foyer principal, le foyer conjugué à son tour passe de é du centre, et il s'en éloigne à mesure que le point lu- approche du foyer principal. Si le point lumineux coïn- le foyer principal, les rayons réfléchis, étant parallèles) se rencontrent plus, et, par conséquent, il n'y a pas de ce qui revient au même, il se fait à l'infini.

r *virtuel.* — Soit enfin le cas où l'objet est placé en L

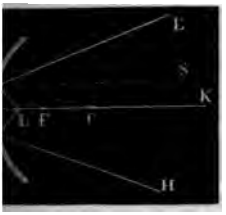


Fig. 382.

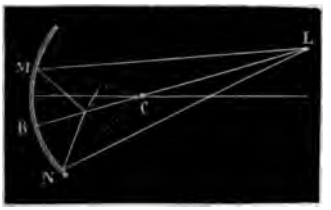


Fig. 383.

, entre le foyer principal et le miroir. Un rayon quelcon- mis du point L, fait alors, avec la normale CM, un angle e LMC plus grand que FMC; l'angle de réflexion doit plus grand que l'angle CMS. Il suit de là que le rayon E est divergent par rapport à l'axe AK. La même chose pour tous les rayons émis du point L, ces rayons ne se nt pas, et, par conséquent, ne forment pas de foyer con- is si on les conçoit prolongés de l'autre côté du miroir, ait, par les mêmes considérations que ci-dessus (2°), prolongements vont sensiblement concourir en un même ué sur l'axe; en sorte que l'œil qui les reçoit éprouve la pression que si ces rayons étaient émis du point *l*. Il se onc pour l'œil, en ce point, un *foyer virtuel*, effet tout logue à celui que présentent les miroirs plans (492).

remarquer, dans les différents cas qu'on vient de consi- e *le foyer principal et le foyer conjugué sont toujours : même côté que l'objet par rapport au miroir*, tandis yer *virtuel est situé de l'autre côté.*

r *conjugué sur un axe secondaire.* — Jusqu'ici on a e point lumineux placé sur l'axe principal même, et yer se forme sur cet axe; dans le cas où le point lumi-

neux est situé sur un axe secondaire LB (fig. 383), en appliquant à cet axe les mêmes raisonnements qu'à l'axe principal, on reconnaît que le foyer du point L se fait en un point *l* situé sur l'axe secondaire, et que, selon la distance du point L au miroir, ce foyer est un foyer principal, conjugué ou virtuel par rapport à l'axe LB.

498. **Détermination expérimentale des foyers des miroirs concaves.** — On détermine expérimentalement le foyer principal d'un miroir concave en recevant sur le miroir un faisceau solaire dans une direction parallèle à l'axe principal; cherchant, avec un écran de verre dépoli ou de carton, le lieu où la lumière réfléchie se concentre avec plus d'éclat, là est le foyer principal.

Le foyer conjugué se détermine de même en plaçant une bougie allumée au point dont on veut avoir le foyer, et en cherchant le lieu où le faisceau réfléchi présente le maximum d'éclat.

499. **Détermination graphique des foyers des miroirs concaves.** — *Foyer principal.* — Les centres de courbure et de figure d'un miroir concave étant connus, son foyer principal se détermine en prenant le milieu du rayon de courbure. Pour un axe secondaire quelconque, le foyer principal s'obtient de la même manière.

Foyer conjugué. — 1° Soit d'abord le cas où le point lumineux L, dont on cherche le foyer conjugué, est situé sur l'axe principal

Fig. 384.

au delà du centre de courbure (fig. 384). Tirant un rayon incident quelconque LI, la normale IC, et faisant l'angle de réflexion CI*l* égal à CIL, le point *l*, où le rayon réfléchi rencontre l'axe principal, est le foyer conjugué de L. Réciproquement, si le point lumineux est en *l*, son foyer conjugué L se détermine par la même construction.

2° Soit le point lumineux en dehors de l'axe, en L (fig. 385). Étant mené l'axe secondaire LC, remarquons, une fois pour toutes, que tout axe secondaire, de même que l'axe principal, *représente toujours un rayon lumineux incident*, mais un rayon qui se confond avec la normale, et, par suite, avec le rayon réfléchi. Cela posé, on pourrait trouver le foyer conjugué du point L par la même construction que celle de la figure 384; mais, en général on fait usage de la construction suivante, qui est plus simple: au lieu de tirer du point L un rayon incident quelconque, on m

ayon LI parallèle à l'axe principal. Dans ce cas, le rayon ré-
ni devant passer par le foyer principal (497, 1°), on obtient
médiatement sa direction en joignant les points I et F par une
e; celle-ci, prolongée, va couper l'axe secondaire LC en un

385.

t *l* qui est le foyer conjugué cherché, puisque c'est en ce point
concourent les rayons partis du point L.
réciproquement, si le point lumineux est en *l*, on tire, par ce
t et par le foyer F, un rayon incident *l*I, et menant, à partir
une parallèle à l'axe principal, le point L où elle rencontre
secondaire CL est le foyer conjugué de *l*.
yer virtuel. — Les constructions ci-dessus s'appliquent au
foyer virtuel. 1° Si l'objet lumineux L est situé sur l'axe principal, on tire un rayon incident quelconque LI, la normale IC et le rayon réfléchi ID (fig. 386). Celui-ci, prolongé, coupe l'axe secondaire en un point *l* qui

Fig. 386.

: foyer virtuel de L. 2° Si le point lumineux L est hors de
principal (fig. 387), on mène l'axe secondaire LC, un rayon
rallèle à l'axe principal,
joignant I à F, la droite IF,
ngée de l'autre côté du mi-
donne le foyer virtuel *l*,
point de rencontre avec
secondaire CL prolongé
, 3°).

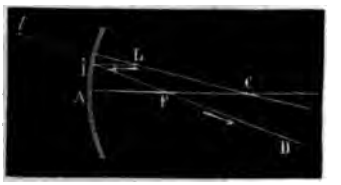


Fig. 387.

verra ci-après (506) qu'on
mine aussi les foyers par
cul, lorsqu'on connaît la distance du point lumineux au mi-
t le rayon de courbure de celui-ci.

. Construction des images réelles dans les miroirs concaves.
objet quelconque étant placé devant un miroir concave,
e qu'en donne celui-ci se construit sans difficulté en s'ap-
t sur ce qui vient d'être dit de la construction des foyers.

En effet, soit un objet AB, placé devant un miroir con
delà du centre (fig. 388). Se bornant à chercher la pos

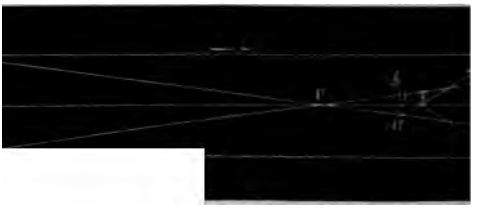


Fig. 388.

points extrêmes de l'image, et ne considérant qu'une sect
cipale du miroir et les lignes qui y sont contenues, on tire
les axes secondaires AE et BI des points A et B; puis, me
point A un rayon incident AD parallèle à l'axe principal,
va passer, après la réflexion, par le foyer principal F (
former en *a*, sur l'axe secondaire AE, l'image du poin
même, le rayon BG, mené du point B parallèlement à l'
former en *b* l'image du point B. On a donc en *ab* l'image
Cette image est réelle, renversée, placée entre le centre
bure et le foyer principal, et d'autant plus petite par
à l'objet, que celui-ci est plus éloigné.

Réciproquement, si l'objet lumineux ou éclairé, dont on
l'image, est placé en *ab* (fig. 388), entre le foyer princi
centre, son image se forme en AB. Elle est encore réelle
versée, mais plus grande que l'objet, et *d'autant plus gra*
ab *est plus près du foyer principal.*

Fig. 389.

Si l'objet est placé au foyer principal même (fig. 389),
produit aucune image. En effet, les rayons AI et AK
point A donnant, après la réflexion, un faisceau KIGH pa
l'axe secondaire CK, et les rayons émis du point B un fais
rallèle à BC (497, réciproque), ces faisceaux ne peuven
ni foyers ni images.

Enfin, lorsque l'objet *ab* a tous ses points hors de l'axe princi-
al (fig. 390), on trouve par la construction ci-dessus que l'image
e forme en *a'b'*, de l'autre côté de l'axe AB.

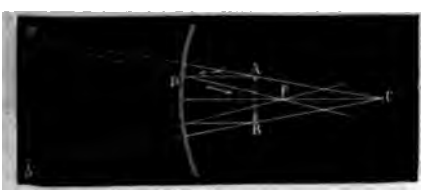
Fig. 390.

Images aériennes. — Il est à remarquer qu'on peut voir les
ages réelles de deux manières : en les recevant sur un écran
i, par réflexion, les fait voir dans toutes les directions ; ou bien,
placant l'œil en deçà de l'image, de façon à recevoir les rayons
fléchis qui la produisent. On aperçoit alors, dans l'espace, une
age qu'on désigne sous le nom d'*image aérienne*.

301. Construction des images virtuelles dans les miroirs concaves. — On a vu qu'il n'y a foyer virtuel dans les miroirs concaves qu'au-
à que les rayons partent d'un point situé entre le foyer princi-
l et le miroir (497, 3°) ; c'est donc dans cette position que doit
e l'objet dont on cherche l'image virtuelle.

Cela posé, soit un objet AB placé devant un miroir concave,
tre le foyer principal et le miroir (fig. 391). On trace d'abord
axes secondaires des points A et B, en ayant soin de les pro-
ger au delà du miroir. Puis, tirant le rayon incident AD paral-
à l'axe principal, et, par le foyer F, le rayon réfléchi DF, ce
ier, prolongé, va donner en *a* l'image virtuelle du point A. De

. 391.



le rayon mené du point B parallèlement à l'axe donne en
e du point B. On a donc en *ab* l'image de AB, *virtuelle*,
e, plus grande que l'objet, et située derrière le miroir.

Miroirs convexes, leurs foyers. — Dans les miroirs con-
n'y a que des foyers virtuels. Soient, en effet, des rayons
(fig. 392) parallèles à l'axe principal d'un miroir con-

vexe. Ces rayons, après leur réflexion, prennent des directions divergentes IM, KH,... qui, prolongées, vont concourir en un point F, qui est le *foyer principal virtuel* du miroir. Au moyen du

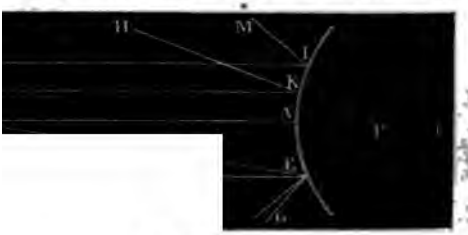


Fig. 392.

triangle CKF, qui est isocèle, on démontrerait, de la même manière que dans les miroirs concaves, que le point F est le milieu du rayon de courbure CA.

Si les rayons lumineux incidents, au lieu d'être parallèles à l'axe, partent d'un point L situé sur l'axe à une distance finie, on reconnaît facilement que le foyer est encore virtuel, mais vient se faire en *l, entre le foyer principal* F *et le miroir*.

503. **Détermination expérimentale du foyer principal dans les miroirs convexes.** — Pour trouver expérimentalement le foyer virtuel principal d'un miroir convexe, on le recouvre de papier, en ayant soin de réserver dans celui-ci, à égale distance du centre de

Fig. 393.

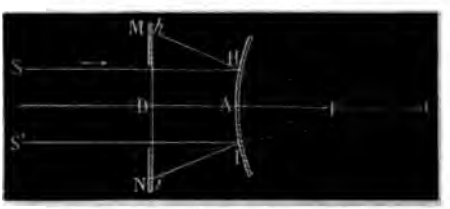


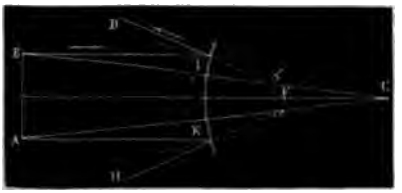
figure A, et dans un même plan méridien (fig 393), deux petites ouvertures circulaires en H et en I, qui laissent le miroir à nu. On place ensuite devant le miroir un écran MN, percé à son centre d'une ouverture circulaire plus grande que la distance HI. Si l'on reçoit alors sur le miroir un faisceau de rayons solaires SH, S'I, parallèles à l'axe, la lumière se réfléchit en H et en I, sur les parties où le miroir est à découvert, et va former sur l'écran deux images brillantes en *h* et en *i*. En reculant l'écran MN, ou en l'approchant, on trouve une position où $hi = 2HI$. La distance AD de

n au miroir représente alors la distance focale principale. et, l'arc HAI, qui est d'un petit nombre de degrés, se con- nt sensiblement avec sa corde, les triangles semblables FHI f donnent $\frac{HI}{hi}=\frac{FA}{FD}$; mais HI étant la moitié de *hi*, FA est [illegible] de FD; donc AD est sensiblement égal à AF. D'ailleurs, [illegible] rayons SH et S'I sont parallèles à l'axe, FA est la dis- [illegible] principale; donc AD représente bien cette distance.

[illegible] **détermination graphique du foyer principal dans les mi- [illegible].** — Par le même raisonnement que pour la figure [illegible] reconnaît facilement que le triangle CFH (fig. 393) est [illegible] que le point F est le milieu de AC, ce qui donne le [illegible] de déterminer le foyer principal quand on connaît les cen- e courbure et de figure C et A.

[illegible]. **Construction des images dans les miroirs convexes.** — Soit jet AB (fig. 394) placé devant un miroir convexe, à une dis- quelconque. Tirant les axes secondaires AC et BC, et des

g. 394.



A et B des rayons incidents AK et BI parallèles à l'axe prin- on sait que le prolongement du rayon réfléchi en K doit aller en F; joignant donc le point K au point F par la droite KF, i coupe l'axe secondaire AC en un point *a* qui est le foyer l de A. Celui de B s'obtenant de même en *b*, l'œil qui reçoit yons réfléchis ID et KH voit en *ab* l'image de AB, *image urs virtuelle, redressée et plus petite que l'objet.*

Formules relatives aux miroirs sphériques. — La relation qui existe a position relative d'un objet et celle de son image dans les miroirs sphé-

g. 395.

ent se représenter par des formules très-simples. Pour cela, considérons un miroir concave, et représentons par R son rayon de courbure, par *p* la LA de l'objet L au miroir (fig. 395), et par *p'* la distance *l*A de l'image

transposant et réduisant, on trouve $Rp + Rp' = 2pp'$ [1].

Si l'on divise tous les termes de cette égalité par $pp'R$, et qu'o

les facteurs communs, elle prend la forme $\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{2}{R}$ [2], sous la

considère ordinairement.

En résolvant l'équation [1] par rapport à p', on en tire $p' = \frac{pR}{2p -}$

mule qui fait connaître la distance de l'image au miroir quand on c

de l'objet et le rayon de courbure.

507. **Discussion de la formule des miroirs concaves.** — Cher

tenant les différentes valeurs que prend p' suivant celles qu'on do

1° Soit d'abord l'objet lumineux ou éclairé placé sur l'axe à une d

nie, cas où les rayons incidents sont parallèles. Pour interpréter la

prend alors p', il faut diviser par p les deux termes de la fraction $\frac{R}{2p}$

donne $p' = \frac{R}{2 - \frac{R}{p}}$ [4]. Or, en introduisant dans cette formule la co

est infini, la fraction $\frac{R}{p}$ est nulle, et on a $p' = \frac{R}{2}$, c'est-à-dire que l'

au foyer principal; ce qui devait être, puisque les rayons incidents f

un faisceau parallèle à l'axe.

2° Si l'objet s'approche du miroir, p décroît, et, le dénominateur d

[4] diminuant, la valeur de p' augmente; par conséquent, l'image s

centre en même temps que l'objet; mais elle est toujours comprise e

principal et le centre, car tant que p est $> R$, on a $\frac{R}{2 - \frac{R}{p}} > \frac{R}{2}$

3° Si l'objet coïncide avec le centre, ce qui s'exprime en faisant p

$p' = R$, c'est-à-dire que l'image coïncide avec l'objet.

4° L'objet lumineux passant entre le centre et le foyer principal

ntraire de p. En effet, l'image est alors virtuelle et située de l'autre côté roir (497, 3°).

ntroduisant dans la formule [2] la condition que p' est négatif, cette for-

levient $\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=\frac{2}{R}$; sous cette forme, elle comprend le cas des images lles dans les miroirs concaves.

oirs convexes. — Dans ces miroirs, l'image étant toujours virtuelle (505), t sont de même signe, puisque l'image et le centre sont d'un même côté du , tandis que, l'objet étant de l'autre côté, p est de signe contraire; en in-ant cette condition dans la formule [2], on trouve, pour la formule rela-

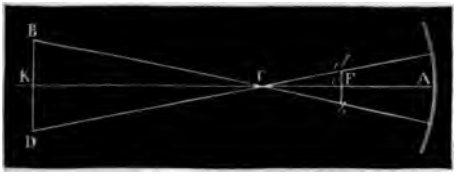
ux miroirs convexes $\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{2}{R}$ [5]. Du reste, on pourrait la trouver di-

ent par les mêmes considérations géométriques qui ont fait trouver la le [2] des miroirs concaves.

mporte d'observer que les différentes formules qui précèdent ne sont pas rences, puisqu'elles s'appuient sur des hypothèses qui ne le sont pas elles-s, savoir, que les droites LM et lM (fig. 395) sont égales à LA et à lA, ce qui vrai qu'à la limite, quand l'angle MCA est nul; mais ces formules appro-, d'autant plus d'être exactes, que l'ouverture du miroir est plus petite.

. **Calcul de la grandeur des images.** — A l'aide des formules ci-dessus, ent facilement calculer la grandeur d'une image, quand on connaît la dis-de l'objet, sa grandeur et le rayon du miroir. En effet, si l'on représente

fig. 396.



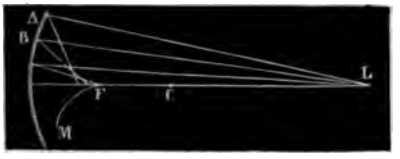
té par BD (fig. 396), son image par bd, et si l'on suppose connus la distance à le rayon AC, on calcule Ao au moyen de la formule [3] du paragraphe 506. ne fois connu, on en déduit oC. Or les deux triangles BCD et dCb étant sem-

bles, on a entre leurs bases et leurs hauteurs la proportion $\frac{bd}{BD}=\frac{Co}{CK}$, d'où

ire la grandeur bd de l'image.

. **Aberration de sphéricité, caustiques.** — Dans la théorie des foyers

fig. 397.



s images dans les miroirs sphériques, on a déjà remarqué que les rayons bis ne viennent sensiblement concourir en un point unique qu'autant que erture du miroir ne dépasse pas 8 à 9 degrés (497). Pour une ouverture grande, les rayons réfléchis près des bords vont rencontrer l'axe plus près du r que ceux qui se sont réfléchis à une petite distance du centre de figure. De

là résulte, dans les images, un défaut de netteté qu'on désigne sous le nom d'*aberration de sphéricité par réflexion*, pour la distinguer de l'aberration de sphéricité par réfraction que présentent les lentilles (539).

Les rayons réfléchis se coupant successivement deux à deux, comme on le voit au-dessus de l'axe FL (fig. 397), leurs points d'intersection forment, dans l'espace, une surface brillante qu'on nomme *caustique par réflexion*. La courbe FM représente une des branches de la section principale de cette surface.

510. Applications des miroirs. — On connaît les applications des miroirs plans dans l'économie domestique. Ces miroirs sont aussi d'un fréquent usage, dans plusieurs appareils de physique, pour donner à la lumière une direction déterminée. Si c'est la lumière solaire qu'on veut ainsi diriger, on ne peut conserver aux rayons réfléchis une direction constante qu'autant que le miroir est mobile. Il faut, en effet, donner à celui-ci un mouvement qui compense le changement de direction que prennent sans cesse les rayons incidents, en vertu du mouvement apparent du soleil. Ce résultat s'obtient par un mouvement d'horlogerie qui fait varier l'inclinaison du miroir au moyen d'une tige à laquelle celui-ci est fixé. L'appareil ainsi construit a reçu le nom d'*héliostat*. La réflexion de la lumière a encore été utilisée pour mesurer les angles des cristaux avec une grande précision, au moyen d'instruments connus sous le nom de *goniomètres à réflexion*.

Les miroirs sphériques concaves ont aussi reçu de nombreuses applications. On s'en sert comme miroirs grossissants : tels sont les miroirs à barbe. On a déjà vu l'usage qu'on peut en tirer comme miroirs ardents (426) ; ils sont encore employés dans les télescopes. Enfin ces miroirs peuvent aussi servir comme réflecteurs pour porter la lumière à de grandes distances, en plaçant une source lumineuse à leur foyer principal ; mais, pour cet usage, on doit préférer les miroirs paraboliques.

511. Miroirs paraboliques. — Les *miroirs paraboliques* sont des miroirs concaves dont la surface est engendrée par la révolution d'un arc de parabole AM autour de son axe AX (fig. 398).

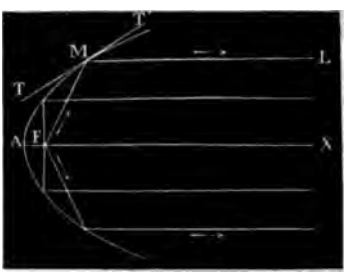


Fig. 398.

Fig. 399.

On a vu ci-dessus (509) que, dans les miroirs sphériques, les rayons parallèles à l'axe ne viennent qu'approximativement concourir au foyer principal ; il en résulte réciproquement qu'une source de lumière étant placée au foyer principal de ces miroirs, les rayons réfléchis ne forment pas rigoureusement

rallèle à l'axe. Or ce défaut ne se rencontre pas dans les miroirs pa-
qui sont plus difficiles à construire que les miroirs sphériques, mais
e est bien préférable pour réflecteurs. En effet, c'est une propriété
a parabole, qu'en un point quelconque M de cette courbe, le rayon
et la droite ML, parallèle à l'axe, font avec la tangente TT' des
ix. Par suite, dans ces sortes de miroirs, tous les rayons parallèles
t rigoureusement concourir, après la réflexion, au foyer F du miroir;
uement, une source de lumière étant placée en ce foyer, les rayons
ui tombent sur le miroir se réfléchissent en un faisceau rigoureuse-
èle à l'axe. Il suit de là que la lumière ainsi réfléchie tend à conser-
e intensité à une grande distance; car on sait (484) que c'est sur-
ergence des rayons qui affaiblit l'intensité de la lumière.
près la propriété ci-dessus des miroirs paraboliques que les lampes
sur les voitures publiques, ainsi que celles qui sont à l'arrière et à
trains de chemin de fer, sont munies de réflecteurs paraboliques. Ces
éflecteurs ont aussi été longtemps en usage pour les phares; mais
de préférence aujourd'hui des verres lenticulaires.
nt par un plan passant par le foyer et perpendiculaire à l'axe deux
aboliques égaux, et les réunissant suivant leurs intersections, comme
a figure 399, en sorte que leurs deux foyers coïncident, on obtient
de réflecteurs avec lequel une seule lampe éclaire à la fois dans deux
pposées. C'est ce système qu'on adopte pour les escaliers, afin de
en même temps dans toute leur étendue.

CHAPITRE III

RÉFRACTION SIMPLE, LENTILLES

ème de la réfraction. — La *réfraction* est une dé-
ouvent les rayons lumineux lorsqu'ils passent obli-
milieu dans un autre : par exemple, de l'air dans
tout autre milieu transparent. Nous disons *oblique-*
rayon lumineux est perpendiculaire à la surface qui
ux milieux, il n'y a pas dé-
rayon continue à se pro-
droite.
cident étant représenté par
on nomme *rayon réfracté*
il que prend la lumière dans
milieu, et les angles SOA et
orment ces rayons avec la droite
ale à la surface qui sépare les

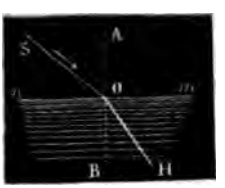


Fig. 400.

eux, sont nommés, l'un *angle d'incidence*, et l'autre
réfraction. Suivant que le rayon réfracté s'approche
e de la normale, on dit que le second milieu est plus ou
ringent que le premier.

Le calcul montre que le sens de la réfraction dépend de la vitesse relative de la lumière dans les deux milieux. Dans le système des ondulations, le milieu le plus réfringent est celui dans lequel la vitesse de propagation est moindre.

La lumière incidente qui se présente pour passer d'un milieu dans un autre ne pénètre jamais complétement dans celui-ci : une partie se réfléchit à la surface qui sépare les deux milieux et l'autre partie pénètre seule dans le second. De là, perte de lumière toutes les fois qu'un faisceau lumineux traverse un milieu transparent.

Dans les milieux non cristallisés, comme l'air, les liquides, le verre ordinaire, le rayon lumineux, simple à l'incidence, reste simple après la réfraction; mais dans certains corps cristallisés, comme le spath d'Islande, le gypse, le rayon incident donne naissance à deux rayons réfractés. Le premier phénomène constitue la *réfraction simple;* le second, la *double réfraction.* Il ne sera question ici que de la réfraction simple; la théorie de la double réfraction sera donnée plus tard (608).

513. **Lois de la réfraction simple.** — Pour interpréter ces lois, rappelons qu'un angle étant donné, si l'on décrit de son sommet comme centre, avec un rayon égal à l'unité, un arc AB, qui en mesure, le *sinus* de l'angle ACB, ou de l'arc AB (fig. 401), est la perpendiculaire BP abaissée d'une extrémité de l'arc sur le rayon qui passe par l'autre extrémité. L'angle BCA croissant de zéro à 90 degrés, le sinus croît de zéro à 1; puis, l'angle continuant de croître jusqu'à 180 degrés, le sinus décroît de 1 à zéro. Ajoutons qu'on a calculé des tables, connues sous le nom de *tables des sinus,* qui font connaître le sinus d'un angle quand celui-ci est connu en degrés, et réciproquement.

Cela posé, tout rayon lumineux qui passe d'un milieu dans un autre, est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant pour deux mêmes milieux, mais variable si les milieux changent.*

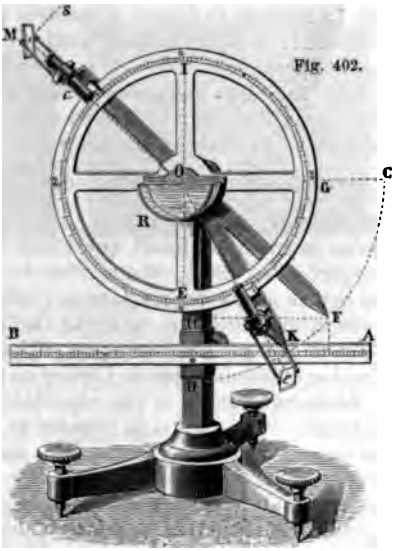
2° *Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux.*

La première de ces lois est connue sous le nom de *loi de Descartes,* qui, le premier, l'a fait connaître.

Pour démontrer les lois de la réfraction, on emploie l'appareil que pour les lois de la réflexion (487), en remplaçant le miroir plan, placé au centre du cercle gradué, par un vase cylindrique de verre R rempli d'eau, en sorte que la s

soit exactement à la hauteur du centre du cercle (fig. 402).
, sur le pied de l'appareil on fixe, à l'aide d'une vis de
, une règle horizontale AB divisée en millimètres. Cette
u'on abaisse ou qu'on élève à volonté, donne la longueur
s des angles d'incidence et de réfraction. Enfin, on facilite

Fig. 401.



nce en ajoutant à
K un écran de
poli *e*, sur lequel
le rayon réfrac-
pareil ainsi dis-
fait arriver un
mineux S sur le
, qu'on incline
ce que le rayon
MO, passant par
e, se dirige vers
du cercle gradué. Là, le rayon se réfracte à son entrée
au; mais il en sort sans réfraction, parce qu'à sa sortie
tion est normale à la paroi cylindrique du vase R. Pour
marche du rayon réfracté, on tourne l'alidade K, jusqu'à
e image lumineuse apparaisse au centre de l'écran *e*.
KOE, que fait alors l'alidade K avec la normale IE menée
d'incidence, est l'angle de réfraction; celui d'incidence
le MOI, égal à FOE, comme opposé par le sommet. Quant
s de ces angles, si du point O comme centre, avec le
K pris pour unité, on décrit l'arc de cercle CD, ils sont
tés, le sinus d'incidence par la droite FH perpendicu-
E prolongée, et le sinus de réfraction par la perpendicu-
aissée de l'extrémité K sur le prolongement de la même
. Ces deux sinus sont mesurés par la règle AB : telle qu'elle
e dans le dessin, elle mesure le sinus de l'angle de réfrac-

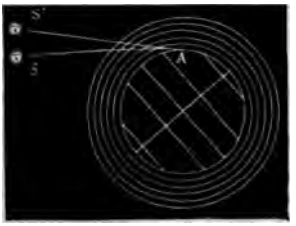
tion; remontée jusqu'en F, elle mesure celui de l'angle d'in dence. Or, en lisant successivement sur la règle les longue des deux sinus, on trouve des nombres variables avec la positi des alidades, mais dont le rapport est constant; c'est-à-dire q le sinus d'incidence devenant deux, trois fois plus grand, il est de même du sinus de réfraction, ce qui démontre la premi loi. La seconde se trouve démontrée par la disposition même l'appareil, le plan du limbe gradué étant vertical et, par con quent, perpendiculaire à la surface du liquide dans le vase fl

514. **Indice de réfraction, indice de retour.** — L'*indice de fraction* est le rapport entre les sinus des angles d'incidence et réfraction. En représentant par n cet indice, et par i et r les ang d'incidence et de réfraction, on a $\frac{\sin i}{\sin r}=n$. L'indice varie a les milieux : de l'air à l'eau, il est $\frac{4}{3}$; de l'air au verre, $\frac{3}{2}$ qu'on exprime en disant que l'indice de réfraction de l'eau rapport à l'air est $\frac{4}{3}$, et que celui du verre est $\frac{3}{2}$. Si la lumiè au lieu de passer de l'air dans une substance, passait du vide d cette même substance, on aurait l'indice de *réfraction absolu* celle-ci. Les gaz étant très-peu réfringents, l'indice de réfra absolue diffère très-peu de l'indice de réfraction par rapport à l

Réciproquement, si l'on considère les milieux dans un inverse, c'est-à-dire si la lumière se propage de l'eau dans ou du verre dans l'air, on constate, au moyen de l'appareil ci sus, que les rayons suivent le même chemin, mais en sens traire, KO devenant le rayon incident, et OM le rayon réfr L'indice de réfraction, qui était d'abord n, est donc actuelle $\frac{1}{n}$: par exemple, de l'eau à l'air il est $\frac{3}{4}$, et du verre à l'air c'est-à-dire que de l'air à un milieu quelconque, l'indice l'*indice de retour* est $\frac{1}{n}$.

515. **Effets produits par la réfraction.** — Par l'effet de la tion, les corps plongés dans un milieu plus réfringent que l raissent rapprochés de la surface de ce milieu; ils en paraî au contraire, écartés, s'ils étaient dans un milieu moins gent. Soit, par exemple, un objet L plongé dans une mas (fig. 403). En passant de ce liquide dans l'air, les rayons LA, s'écartent de la normale au point d'incidence et prennent rections AC, BD,... dont les prolongements concourent se ment en un point L' situé sur la verticale LK. L'œil qui ces rayons voit donc l'objet L en L'. Plus les rayons AC, sont réfractés, plus l'objet paraît relevé.

même effet, un bâton plongé obliquement dans l'eau isé (fig. 404), la partie immergée paraissant relevée. core par un effet de réfraction que les astres nous parais- ts au-dessus de l'horizon. En effet, les couches de l'atmo- ymentant de densité en se rapprochant du sol, et pour un



32. Fig. 404. Fig. 405.

la puissance réfractive croissant avec la densité (526), te qu'en entrant dans l'atmosphère et en s'y propageant, lumineux se brisent, comme le montre la figure 405, nt une courbe qui arrive jusqu'à l'œil; c'est donc sui- agente à cette courbe que nous voyons l'astre en S' au voir en S. L'effet est d'autant plus marqué, que l'astre isin de l'horizon. Dans nos climats, la réfraction atmo- ne relève pas les astres de plus d'un demi-degré.

ngle limite, réflexion totale. — Quand un rayon lumi- e d'un milieu dans un autre moins réfringent, comme

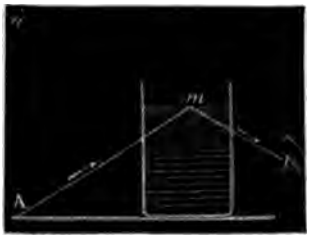


Fig. 406. Fig. 407.

ns l'air, on a vu (512) que l'angle de réfraction est alors l que l'angle d'incidence. Il suit de là que, quand la lu- ropage dans une masse d'eau, de S en O (fig. 406), il y une valeur de l'angle d'incidence SOB pour laquelle

incidence est alors réfléchie en totalité. De l'eau à l'air
mite est de 48° 35′; du verre à l'air, il est de 41° 48′.

On constate la réflexion intérieure en plaçant devan
verre rempli d'eau un objet A (fig. 407); puis, regar
tre côté du vase la surface du liquide de bas en hau
montre la figure, on aperçoit en a, au-dessus du liqu
de l'objet A, laquelle est formée par les rayons réfléc
au contraire, on place l'œil au-dessus de la surface
paraît complétement opaque par rapport au point A.

θ étant l'angle limite pour lequel l'angle de réfraction r égal
a $\sin r = 1$, et, par suite, la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, qui correspon
la lumière d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfr
$\sin \theta = \frac{1}{n}$. De cette dernière, on déduit l'angle limite quand l'i
et réciproquement.

517. **Mirage.** — Le *mirage* est une illusion d'opt
voir, au-dessous du sol ou dans l'atmosphère, l'ima
des objets éloignés. Ce phénomène s'observe fréquem
pays chauds, et particulièrement dans les plaines sab
l'Égypte. Là, le sol présente souvent l'aspect d'un la
sur lequel se réfléchissent les arbres et les villages e
Ce phénomène a été observé dès la plus haute antiqui
Monge, le premier, qui en a donné l'explication, lo
partie de l'expédition d'Égypte.

Le mirage est un phénomène de réfraction, qui rés
vale densité des couches de l'atmosphère lorsqu'elles

ure, et subit une suite de réfractions successives
e des premières, car il passe maintenant dans des
s en plus réfringentes. Le rayon lumineux arrive
l'observateur avec la même direction que s'il était
l situé au-dessous du sol, et c'est pour cela qu'il

Fig. 408.

ge renversée de l'objet qui l'a émis, comme s'il
au point O, sur la surface d'un miroir.
es navigateurs observent dans l'atmosphère l'image
ôtes ou des navires éloignés : c'est encore un effet
s qui se produit en sens contraire du premier, et
ue la mer est plus froide que l'air ; car ce sont alors
rieures de l'atmosphère qui sont les plus denses,
contact avec la surface des eaux.

DE LA LUMIÈRE A TRAVERS LES MILIEUX DIAPHANES

à faces parallèles. — Lorsque la lumière traverse
es parallèles, les
ls, c'est-à-dire
t, sont parallèles
dents.

r, soient MN (fig. 409)
à faces parallèles, SA
DB le rayon émergent,
ncidence et de réfrac-
rayon, et enfin i' et
s à sa sortie. En A,
une première réfrac-

Fig. 409.

st $\frac{\sin i}{\sin r}$. En D, elle se réfracte une seconde fois, et l'indice

est alors $\frac{\sin i'}{\sin r'}$. Or on a vu (514) que l'indice de réfraction du verre à l'

est le même que celui de l'air au verre renversé; on a donc $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{\sin r}{\sin i}$.

Mais les deux normales AG et DE étant parallèles, les angles r et i' s égaux comme alternes-internes. Par conséquent, les numérateurs des deux r ports ci-dessus étant égaux, il en est de même des dénominateurs; d'où l'on c clut que les angles r' et i sont égaux, et, par suite, que DB est parallèle à

519. **Prismes.** — On nomme *prisme*, en optique, tout mil transparent compris entre deux faces planes inclinées l'une l'autre. L'intersection de ces deux faces est une ligne droite qui

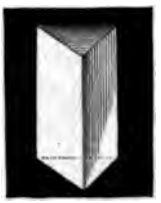


Fig. 410.

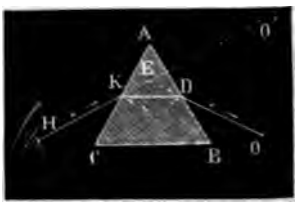


Fig. 411.

l'*arête* du prisme, et l'angle qu'elles comprennent est son an *réfringent*. Toute section perpendiculaire à l'arête est dite sect *principale*. Les prismes qu'on emploie pour les expériences s des prismes triangulaires droits (fig. 410), et leur section prin pale est un triangle (fig. 411). Dans cette section, le point A pre le nom de *sommet* du prisme, et la droite BC est dite sa ba expressions qui, géométriquement, ne conviennent qu'au triang ABC, et non au prisme.

520. **Marche des rayons dans les prismes, angle de déviation.** Les lois de la réfraction connues, il est facile de déterminer marche de la lumière dans les prismes. Soit, en effet, un pa lumineux O (fig. 411) contenu dans le plan de la section prin pale ABC d'un prisme, et soit OD un rayon incident. Ce rayon réfracte en D, en se rapprochant de la normale, puisqu'il en dans un milieu plus réfringent, et prend une direction DK, dé minée par l'égalité $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{3}{2}$, qui donne l'angle r quand on conn l'angle i. En K, le rayon subit une seconde réfraction; mais pa sant dans l'air, qui est moins réfringent que le verre, il s'éca de la normale, et prend une direction KH, donnée par l'égal $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{2}{3}$ (514). La lumière se réfracte donc deux fois dans le mê sens, et l'œil qui reçoit le rayon émergent KH voit l'objet O

'; c'est-à-dire que *les objets vus à travers un prisme paraissent elevés vers son sommet*. De plus, l'image O' du point O est virtuelle.

La déviation que le prisme imprime à la lumière est mesurée ar l'angle OEO' que forment entre eux le rayon incident et le ayon émergent, c'est l'*angle de déviation*. Cet angle augmente

g. 412.

Fig. 413.

ec l'indice de réfraction et avec l'angle réfringent du prisme. Il rie aussi avec l'angle d'incidence du rayon lumineux à son drée dans le prisme : la déviation décroît avec cet angle, mais alement jusqu'à une certaine limite, qui se détermine par le cul (523), quand on connaît l'angle d'incidence du rayon et ngle réfringent du prisme.

On démontre que l'angle de déviation augmente avec l'indice de raction au moyen du *polyprisme*. On nomme ainsi un prisme mé de plusieurs prismes de même angle, réunis par leurs bases suite les uns des autres (fig. 412); ces prismes sont de subces inégalement réfringentes, par exemple de flint, de cristal roche, de crown. Or, si l'on regarde un même objet, une ligne te par exemple, à travers le polyprisme, les différentes parties ont vues à des hauteurs inégales. La portion la plus relevée celle vue à travers le flint, dont l'indice de réfraction est le grand; puis celle qui est vue à travers le cristal de roche, et i de suite dans l'ordre des indices de réfraction décroissants; l'on conclut que l'angle de déviation dans les différents pris- diminue avec l'indice de réfraction.

Pour montrer que l'angle de déviation croît avec l'angle réfringent du prisme, on fait usage du *prisme à angle variable*. Celui-ci se compose de deux plaques de cuivre parallèles B et C, fixées sur un pied (fig. 413). Entre les plaques sont deux glaces *m* et *n* mobiles sur charnières, et pouvant glisser entre les plaques à frottement dur, de manière à fermer hermétiquement. En versant dans le vase ainsi formé de l'eau, ou un autre liquide plus réfringent, et en inclinant plus ou moins les glaces, on a un prisme à angle variable. En recevant sur l'une d'elles un rayon lumineux S, et en inclinant l'autre de plus en plus, l'angle du prisme croît, et on voit la déviation du rayon émergent E augmenter.

521. **Application des prismes rectangles comme réflecteurs.** — Les prismes dont la section principale est un triangle rectangle isocèle offrent une application importante de la réflexion totale (516). En effet, soient ABC (fig. 414) la section principale d'un pareil prisme, O un point lumineux et OH un rayon perpendiculaire à la face BC. Ce rayon, entrant dans le verre sans se réfracter (512), va faire avec la grande face AB un angle égal à B, c'est-à-dire de 45 degrés, et par suite plus grand que l'angle limite du verre, lequel est de 41° 48′ (516). Le rayon OH subit donc en H la réflexion totale, qui lui imprime une direction HI perpendiculaire à la seconde face AC. La grande face du prisme produit donc ici l'effet du miroir plan le plus parfait, et un œil placé en I voit en O′ l'image du point O. Cette propriété des prismes rectangles est utilisée dans plusieurs instruments d'optique.

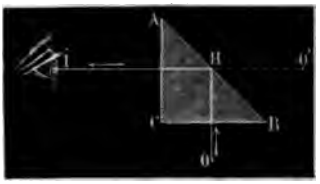


Fig. 414.

* 522. **Condition d'émergence dans les prismes.** — Les rayons lumineux qui se sont réfractés à la première face d'un prisme ne peuvent émerger à la deuxième qu'autant que l'angle réfringent du prisme est moindre que le double de l'angle limite de la substance dont le prisme est formé.

En effet, en représentant par LI (fig. 415) le rayon incident sur la première face, par IE ce rayon réfracté, par PI et PE les normales, on sait que le rayon IE ne peut émerger à la seconde face que si l'angle d'incidence IEP est moindre que l'angle limite (516). Or l'angle d'incidence NIL augmentant, il en est de même de l'angle EIP, tandis que IEP diminue. Par conséquent, plus la direction du rayon LI approche d'être parallèle à la face AB, plus ce rayon tend à donner un rayon émergent à la seconde face.

Soit donc le cas où LI serait parallèle à AB, l'angle r est alors égal à la limite l du prisme, puisqu'il a sa valeur maximum. D'ailleurs l'angle EIP intérieur au triangle IPE, égale $r+i'$; mais les angles EPK et A sont considérés comme ayant leurs côtés perpendiculaires; donc $A=r+i'$; donc aussi $A=l$ puisque, dans le cas que nous considérons, $r=l$. Par conséquent, si

on aura $i' = l$, ou $> l$; il ne saurait donc y avoir émergence face, mais réflexion intérieure et émergence seulement à la troi-. A plus forte raison, il en sera de même encore pour les rayons 'incidence est moindre que BIN, puisque on a vu ci-dessus que lors en croissant. Ainsi, dans le cas où l'angle réfringent est égal grand, aucun rayon lumineux ne peut passer à travers les faces

te du verre étant 41° 48′, le double de cet angle est plus petit que à l'on conclut qu'on es objets à travers erre dont l'angle ré-roit. L'angle limite 48° 35′, la lumière verser l'angle droit ectangle creux qui ar trois glaces et

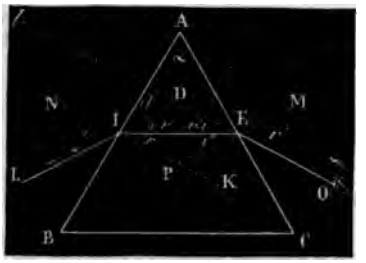


Fig. 415.

A $< 2l$, il y a tou-e, à la seconde face, le la lumière qui emière, et la quan-qui passe dépend de rayons directs LI. s entre l et $2l$, une ons incidents compris dans l'angle NIB peuvent émerger; mais ris dans l'angle NIA éprouvent la réflexion totale sur la face AC. $< l$, tous les rayons compris dans l'angle NIB et une partie de dans l'angle NIA peuvent passer.

ion minimum. — Lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire verture A pratiquée dans le volet d'une chambre obscure (fig. 416). ne le faisceau va se projeter suivant une droite AC sur un écran l'on interpose un prisme vertical entre l'ouverture du volet et l'é-a est porté vers la base du prisme et vient se projeter en D, loin

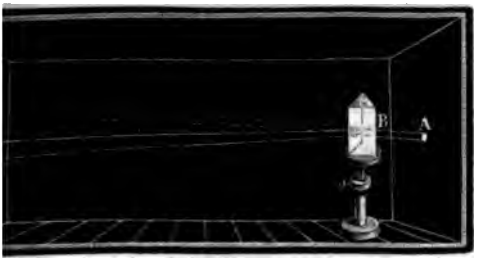


Fig. 416.

d l'on tourne alors le support qui porte le prisme de manière que ce décroisse, on voit le faisceau D se rapprocher du point C jus-e position E, à partir de laquelle il revient sur lui-même, lors-à tourner le prisme dans le même sens. Il y a donc une déviation que toutes les autres. Cette *déviation minimum* a lieu quand idence et d'émergence sont égaux.

viation minimum peut se déterminer par le calcul quand on con-

nait l'angle d'incidence et l'angle réfringent du prisme. En effet, lorsqu'il y a déviation minimum, l'angle d'émergence r' étant égal à l'angle d'incidence i (fig 415), il faut que $r = i'$. Or on a vu ci-dessus (522) que $A = r + i'$; donc $A = 2r$ [1]. Cela posé, si l'on représente par d l'angle de déviation minimum IDL, cet angle étant extérieur au triangle DIE, on trouve facilement l'égalité

$$d = i - r + r' - i' = 2i - 2r, \quad \text{ou} \quad d = 2i - A \ [2],$$

laquelle fait connaître l'angle d quand les angles i et A sont donnés.

Des formules [1] et [2] on en tire une troisième qui sert à calculer l'indice de réfraction d'un prisme, quand on connaît son angle réfringent et la déviation minimum. En effet, si dans l'égalité $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ (514), on remplace i et r par leurs valeurs tirées des formules [1] et [2] ci-dessus, il vient $n = \frac{\sin\left(\frac{A+d}{2}\right)}{\sin\frac{A}{2}}$ [3].

* 524. **Mesure de l'indice de réfraction des solides.** — Au moyen de la formule [3] ci-dessus, on calcule facilement l'indice de réfraction quand les angles A et d sont connus.

Pour déterminer d'abord l'angle A, on taille sous la forme de prisme triangulaire la substance transparente dont on veut avoir l'indice de réfraction; puis on mesure l'angle A du prisme au moyen d'un *goniomètre* (510).

Quant à l'angle d, on le mesure de la manière suivante. On reçoit sur le prisme

Fig. 417.

un rayon LI émis par un objet éloigné (fig. 417), et l'on tourne le prisme de manière à obtenir la déviation minimum ED. Mesurant alors avec un cercle gradué l'angle EDL' que fait le rayon réfracté DE avec le rayon DL' qui vient directement de l'objet, cet angle n'est autre que l'angle de déviation minimum, en admettant que l'objet est assez éloigné pour que les deux rayons LI et L'D soient parallèles. Il ne reste plus qu'à substituer les valeurs de A et de d dans la formule [3] pour en déduire la valeur de l'indice n.

Ce procédé est dû à Newton. En l'appliquant successivement aux principales raies de Fraünhofer (551), on détermine avec précision les indices qui correspondent aux différentes couleurs du spectre solaire (541).

* 525. **Mesure de l'indice de réfraction des liquides.** — Biot a appliqué la méthode de Newton, c'est-à-dire celle du minimum de déviation, à la recherche de l'indice de réfraction des liquides. Pour cela, dans un prisme de verre P (fig. 418), on perce une cavité cylindrique O d'environ 2 centimètres de diamètre et allant de la face d'incidence à la face d'émergence. Cette cavité se ferme au moyen de deux plaques de verre à faces parallèles, qui s'appliquent sur les faces du prisme. Une petite ouverture B, qui se ferme avec un bouchon à émeri, sert à introduire les liquides. Ayant déterminé l'angle réfringent et la

prisme liquide compris dans la cavité O, on introduit la ans la formule [3] (523), ce qui donne l'indice.

Indice de réfraction des gaz. — C'est encore par la mé- l'indice de réfraction des gaz a été déterminé par Biot et se sont servis ces physiciens se compose d'un tube de verre biseau à ses extrémités, et fermé par deux plaques de verre ées entre elles de 142 degrés. Ce tube est en communication, che H, dans laquelle est un baromètre à siphon, de l'autre duquel on peut faire le vide dans l'appareil et y introduire après avoir fait le vide dans le tube AB, on le fait traverser re SA, qui s'écarte de la normale d'une quantité $r - i$ à la s'en approche d'une quantité $i' - r'$ à la deuxième. Ces deux la déviation totale d est $r - i + i' - r'$. Or, dans le cas de on a $i = r'$ et $r = i'$, d'où $d = A - 2i$, puisque $r + i' = A$

à l'air, qui est évidemment $\frac{\sin r}{\sin i}$, a donc pour valeur

$$\frac{\sin \frac{A}{2}}{\sin \left(\frac{A - d}{2}\right)} \text{ [4].}$$

naître l'angle réfringent A et l'angle de déviation mini-

8.

ire l'indice de ré- r, c'est-à-dire l'*in- principal* (514). e absolu d'un gaz avoir fait le vide ait passer ce gaz; les A et d, la for- connaître l'indice l'air. Connaissant à l'air, le rapport nne l'indice de ré- az donné, c'est-à-

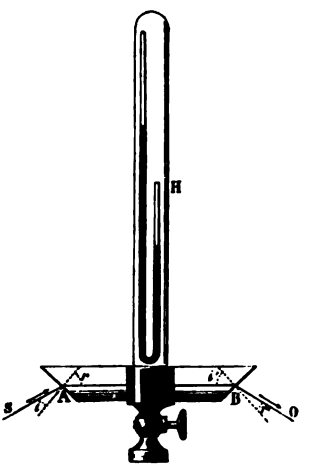


Fig. 419.

appareil, Biot et Arago ont constaté que les indices de ré- toujours très-petits par rapport à ceux des solides et des un même gaz, la *puissance réfractive* est proportionnelle à puissance réfractive d'une substance le carré de son indice d'une unité, c'est-à-dire l'expression $n^2 - 1$. Le quotient de par la densité se nomme *pouvoir réfringent*.

Indices de réfraction par rapport à l'air.

SUBSTANCES	INDICES	SUBSTANCES	INDICES
Chromate de plomb. . . .	2,50 à 2,97	Obsidienne.	1,488
Diamant.	2,47 à 2,75	Glace.	1,310
Verre d'antimoine.	2,216	Sulfure de carbone	1,678
Soufre natif.	2,215	Huile essentielle d'amandes amères	1,603
Tourmaline	1,668	Huile de naphte.	1,475
Spath d'Islande, réf. ord.	1,654	Essence de térébenthine .	1,470
— — réf. ext.	1,483	Alcool rectifié	1,374
Béryl.	1,598	Éther sulfurique.	1,358
Flint-glass.	1,575	Albumine	1,351
Cristal de roche.	1,547	Cristallin.	1,384
Sel gemme.	1,545	Humeur vitrée.	1,339
Sucre	1,535	Humeur aqueuse	1,337
Baume de Canada.	1,532	Eau.	1,336
Crown-glass	1,500		

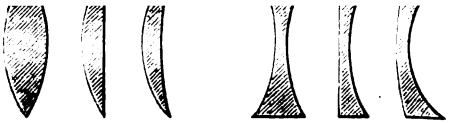
Ces indices ont été pris par rapport au faisceau jaune du spectre, excepté [illegible] du sucre et du crown, qui l'ont été par rapport au rouge extrême.

M. Fizeau a constaté que les indices de réfraction varient avec la temp[illegible]ture. Pour le cristal ordinaire, par exemple, l'indice augmente en même te[illegible] que la température; l'inverse a lieu pour le spath fluor.

LENTILLES, LEURS EFFETS

527. **Différentes espèces de lentilles.** — On nomme *lentilles* [illegible] milieux transparents qui, vu la courbure de leurs surfaces, [illegible] la propriété de faire converger ou diverger les rayons lumin[illegible] qui les traversent. Suivant le genre de cette courbure, les lenti[illegible] sont dites *sphériques, cylindriques, elliptiques, paraboli*[illegible] Les lentilles sphériques sont les seules en usage dans les ins[illegible]ments d'optique. Elles sont généralement de *crown-glass*, [illegible] qui contient peu de plomb, ou de *flint-glass*, verre qui en [illegible]tient beaucoup et est plus réfringent que le crown.

En combinant des surfaces sphériques entre elles, ou avec [illegible] surfaces planes, on obtient six espèces de lentilles, représen[illegible] en coupe dans la figure 420 : quatre sont formées par deux surf[illegible] sphériques, et deux par une surface plane et une surface sphéri[illegible] La première, A, est dite *biconvexe;* la seconde, B, *plan-con*[illegible] la troisième, C, *concave-convexe convergente;* la quatrième, [illegible] *biconcave;* la cinquième, E, *plan-concave;* et la dernière, [illegible] *concave-convexe divergente*. La lentille C s'appelle aussi [illegible] *nisque convergent*, et la lentille F, *ménisque divergent*.



les lentilles dont les deux surfaces sont sphériques, les
le ces surfaces sont dits *centres de courbure;* la droite
ur ces deux centres est l'*axe principal*. Dans une lentille
cave ou plan-convexe, l'axe principal est la perpendicu-
issée du centre de la face sphérique sur la face plane.
ûme *section principale* d'une lentille toute section faite
lan passant par l'axe principal. Dans toutes les construc-
les lentilles, on ne considère que des rayons lumineux
ns une même section principale.
omparer la marche des rayons dans les lentilles à celle
s dans les prismes, on fait la même hypothèse que pour
rs courbes (496), c'est-à-dire qu'on suppose les surfaces
d'une infinité d'éléments plans infiniment petits. La *nor-*
ne point quelconque est alors la perpendiculaire au plan
ui contient l'élément correspondant, et l'on sait, en géo-
me toutes les normales à une même surface sphérique vont
ur son centre. Dans l'hypothèse ci-dessus, on peut conce-
ints d'incidence et d'émergence, deux surfaces planes
ins inclinées entre elles, produisant l'effet du prisme.
ant cette comparaison, on peut assimiler les trois lentilles

1° *Foyer principal.* — Soit d'abord, ainsi que nous l'avons f pour les miroirs, le cas où les rayons qui tombent sur la lenti sont parallèles à son axe principal (fig. 421), ce qui suppose l' jet lumineux situé à une très-grande distance. Tout rayon in dent LB, subissant les mêmes déviations qu'à travers un pris

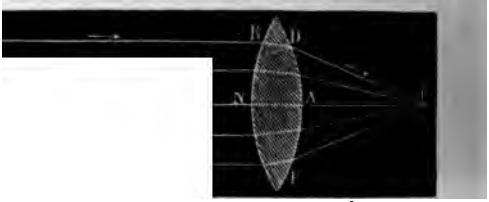


Fig. 421.

(520), se réfracte au point d'incidence B en se rapprochant l'axe principal d'une quantité donnée par l'indice n; puis, à l' mergence D, il s'en rapproche encore d'une quantité donnée p l'indice de retour $\frac{1}{n}$ (514), et vient enfin couper l'axe en F. L autres rayons se comportant de la même manière, le calcul l'expérience font voir que, tant que l'*ouverture* de la lentil c'est-à-dire l'arc DE, ne dépasse pas 10 à 12 degrés, tous l rayons parallèles à l'axe vont très-sensiblement concourir en Ce point est le *foyer principal*, et la distance FA la *distance* *cale principale*. Elle est constante pour une même lentille, m varie avec le rayon de courbure et l'indice de réfraction. Dans l lentilles ordinaires, qui sont de crown, le foyer principal coïnc très-approximativement avec le centre de courbure (538).

Réciproquement, si l'objet lumineux est placé au foyer princi

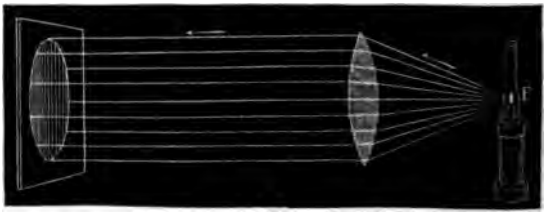


Fig. 422.

(fig. 422), les rayons émergents sortent parallèles à l'axe. L'in *sité* ne décroît alors que très-lentement par l'absorption par l' une seule lampe suffit pour éclairer à une grande distance.

'*oyer conjugué.* — Soit actuellement le cas où l'objet lumi-placé au delà du foyer principal, est assez rapproché pour ı rayons incidents soient divergents (fig. 423). Le point lu-ı étant en L, si l'on compare le rayon divergent LB au

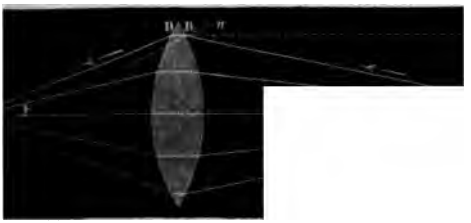
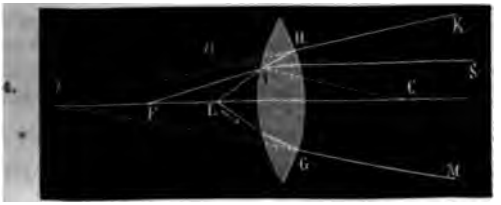


Fig. 423.

3B parallèle à l'axe, on reconnaît que le premier fait avec nale un angle d'incidence LB*n* plus grand que l'angle SB*n* : donc aussi faire un angle de réfraction plus grand. Par après avoir traversé la lentille, il rencontre l'axe en un ' plus éloigné que le foyer principal F. Tous les rayons par-point L venant ainsi concourir sensiblement au même point ernier est le *foyer conjugué* du point L. Cette dénomination ie ici, de même que dans les miroirs, la relation qui existe es deux points L et *l*, relation telle, que si le point lumi-st porté en *l*, réciproquement le foyer passe en L.

esure que l'objet L s'approche de la lentille, la divergence ons incidents et des rayons émergents augmente, et le foyer ué *l* s'éloigne. Si L coïncide avec le foyer principal, les rayons ents sortent parallèles à l'axe, et alors il n'y a pas de foyer, qui est la même chose, il se fait à l'infini.

'*oyer virtuel.* — Enfin, soit le cas où le point lumineux L



cé entre la lentille et son foyer principal (fig. 424); le foyer rs virtuel. En effet, tout rayon incident LI faisant avec la le un angle d'incidence LI*n* plus grand que l'angle FI*n* que

fait, avec la même normale C*n*, le rayon FI émis du
mier rayon, à l'émergence, s'éloigne nécessairemen
second de l'axe principal; il sort donc divergent su
faisceau divergent KHGM ainsi formé ne peut donne
réel; mais ses rayons prolongés allant concourir au
sur l'axe, ce point est le *foyer virtuel* de L. Plus L
de la lentille, plus le foyer virtuel *l* s'en rapproche

529. **Centre optique, axes secondaires.** — Pour tou
existe un point nommé *centre optique*, qui est situ
jouit de cette propriété, que tout rayon passant par
prouve pas de déviation angulaire, c'est-à-dire que l
gent est parallèle au rayon incident. Pour démontr
de ce point dans une lentille biconvexe, soient men

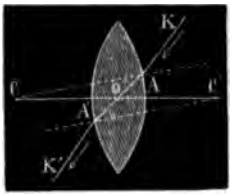


Fig. 425.

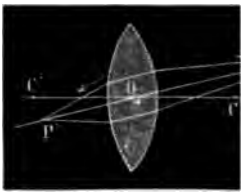


Fig. 426.

surfaces, deux rayons de courbure parallèles CA et (
Les deux éléments plans qui appartiennent à la sur
tille en A et A' étant parallèles entre eux, comm
laires à deux droites parallèles, tout rayon KA, q
dans la lentille suivant AA', traverse en réalité un
parallèles, et par conséquent sort sans déviation, c'
vant une direction A'K' parallèle à AK (518). Le p
rayon coupe l'axe, est invariable; c'est-à-dire qu'i
le même, quels que soient les éléments A, A'. En effet
CA et C'A' sont égaux, ce qui est le cas général, les
et C'A'O le sont aussi, et l'on a CO = C'O; ce qui
dans ce cas, le point O est le milieu de CC'. Si les
C'A' sont inégaux, les triangles COA et C'OA' sont s
l'on a $\frac{CA}{C'A'} = \frac{CO}{C'O}$. Or, le rapport $\frac{CA}{C'A'}$ étant inva
que soient les deux éléments parallèles A, A', on v
de même du rapport $\frac{CO}{C'O}$; ce qui exige que la posi
O soit constante, seulement ce point n'est plus le n
Le point O ainsi obtenu est le *centre optique* de la

es cas, on le détermine en tirant deux rayons de courbure
les CA et C'A', et en joignant leurs deux extrémités par
oite AA'.

s les lentilles biconcaves ou concaves-convexes, le centre
e se détermine par la même construction que ci-dessus.
es lentilles qui ont une face plane, ce point est à l'intersec-
ème de l'axe par la face courbe.

le droite PP' (fig. 426) qui passe par le centre optique sans
par les centres de courbure, est un *axe secondaire*. D'après
riété du centre optique, tout axe secondaire représente un
lumineux rectiligne passant par ce point; car, vu la petite
eur des lentilles, on peut admettre que les rayons qui pas-
r le centre optique restent en ligne droite, c'est-à-dire qu'on
gliger la petite déviation qu'éprouvent les rayons, tout en
parallèles, lorsqu'ils traversent obliquement un milieu à
arallèles (fig. 409, page 469).

que les axes secondaires ne font avec l'axe principal qu'un
gle, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit jusqu'ici
principal; c'est-à-dire que les rayons émis d'un point P
), situé sur un axe secondaire PP', viennent, à très-peu
ncourir en un même point P' de cet axe, où ils forment
qu'on désigne encore sous le nom de *foyer conjugué*.

Détermination expérimentale des foyers dans les lentilles
es. — Dans les lentilles biconvexes, comme dans les mi-
caves, on détermine expérimentalement le foyer principal
nt sur la lentille un faisceau solaire parallèle à l'axe prin-
ls on cherche avec un écran, de l'autre côté de la lentille,
à va se concentrer le faisceau; là est le foyer principal.
e, pour avoir le foyer conjugué d'un point pris sur l'axe
au delà du foyer, on place au point donné la flamme
ie, et l'on cherche avec un écran, de l'autre côté de la
point où vont se concentrer les rayons lumineux.

rmination graphique des foyers dans les lentilles bicon-
Foyer principal. — Les centres de courbure C et C'
, soit un rayon incident PI parallèle à l'axe principal
enant au point I la normale CI, l'angle d'incidence PIB
terminé, et la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ (514) fait ensuite
gle de réfraction CIE, c'est-à-dire la direction du rayon
rant la normale C'E, on a au point E l'angle d'inci-
la formule $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{1}{n}$ fait trouver l'angle d'émer-
par suite le foyer principal F. Les deux rayons de

courbures étant supposés égaux, un second foyer princi existe à la même distance de l'autre côté de la lentille.

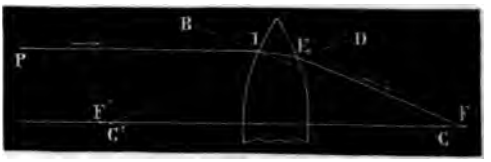


Fig. 427.

2° *Foyer conjugué.* — Le foyer conjugué d'un point si l'axe principal se déterminerait par la même constructi celle qui précède pour le foyer principal; mais, pour un p

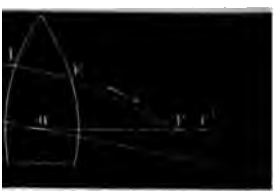
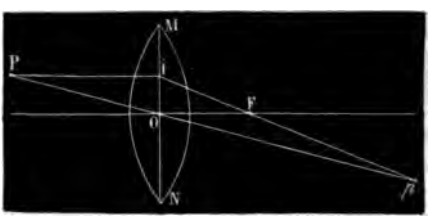


Fig. 428.

tué en dehors de l'axe, supposant connu le foyer principal plus simple, ainsi qu'on l'a déjà fait pour les miroirs (4 considérer un rayon qui, parallèle à l'axe, aille passer par l principal. En effet, soit le point lumineux placé au-dessus d principal en P (fig. 428). Tirant un rayon incident PI par l'axe, ce rayon, après s'être réfracté deux fois dans le mêm

Fig. 429.

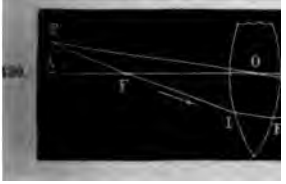


en I et en E, est astreint à passer par le foyer principal F Joignant donc les points E et F par une droite, son prolon va couper l'axe secondaire PO en un point *p*, qui est le foy jugué de P. Dans cette construction et dans les suivantes, l *IE n'est* pas déterminé rigoureusement; il ne peut l'être

ploi de la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, mais la construction ci-dessus lt pour la détermination et la discussion des images.

égligeant l'épaisseur de la lentille, on peut réunir les deux actions en une seule, comme le montre la figure 429. On pro- e alors le rayon parallèle jusqu'à sa rencontre en I avec la te MN, qui joint deux points opposés des bords de la lentille ; , par le point I et par le foyer principal F, on tire une droite prolongée, fait trouver le foyer conjugué p.

ifin, au lieu de faire usage d'un rayon parallèle à l'axe prin- l pour déterminer le foyer conjugué d'un point P donné hors axe, on peut, par le point P et par le foyer F, tirer un rayon lent PI qui, après deux réfractions en I et en E, sort parallèle



xe principal (fig. 430). Le point p où il coupe l'axe secondaire est le foyer conjugué cherché.

Foyer virtuel. — On sait (528, 3°) que pour qu'il y ait foyer el, le point lumineux doit être placé à une distance de la len- moindre que la distance focale principale. Soit donc un point lisant à cette condition (fig. 431) ; menant encore un rayon lent PI parallèle à l'axe FF', ce rayon, qui, à l'émergence, va er par le foyer F, sort divergent par rapport à l'axe secon-

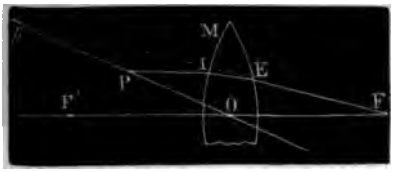


fig. 431.

PO, et son prolongement de l'autre côté de la lentille donne er virtuel p (528, 3°).

2. Construction des images réelles dans les lentilles biconvexes. n sait que, pour que l'image soit réelle dans les lentilles bi- xes, l'objet doit être plus éloigné de la lentille que le foyer ipal. Cela posé, soit un objet lumineux AB placé devant une

lentille biconvexe à une distance plus grande que la dista
cale principale (fig. 432). La construction de l'image se ré
à celle des foyers conjugués des points extrêmes A et B (5
mène d'abord les axes secondaires AO et BO, puis du poi

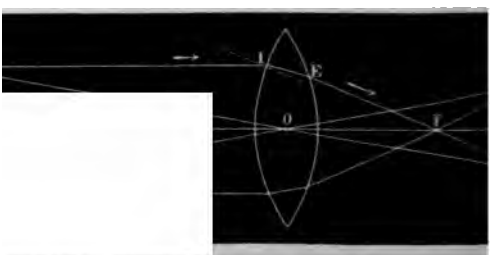


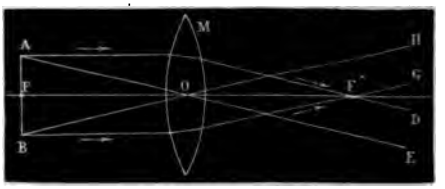
Fig. 432.

rayon incident AI, parallèle à l'axe principal. Ce rayon, qui
avoir traversé la lentille, passe par le foyer principal F,
mer en *a* l'image du point A. Un rayon parallèle tiré de
nant de même en *b* l'image de B, on a en *ab* l'image de A

Cette image est *réelle et renversée*. Pour la voir, il faut l
voir sur un écran blanc qui la réfléchit dans toutes les direc
ou placer l'œil sur le prolongement des rayons émergent
aperçoit ainsi, dans l'espace, une image qui, de même que
les miroirs concaves, est une image aérienne (500).

Lorsque l'objet coïncide avec le foyer principal, l'image
l'infini, c'est-à-dire qu'il n'y a plus d'image. En effet, les r

Fig. 433.



émis de A (fig. 433) donnant, à l'émergence, un faisceau par
DE, et ceux émis de B un faisceau parallèle GH, il n'y a pl
cours des rayons à aucune distance, et par suite pas d'im

533. **Relation entre la grandeur de l'image et celle de l'**
— En s'appuyant sur la formule des lentilles biconvexes d
plus loin (538), on trouve la relation suivante entre la gra
de l'objet et celle de l'image:

Lorsque l'objet est en avant de la lentille, à une distance ›le de la distance focale, l'image est à la même distance de re côté, et de même grandeur que l'objet.

Si l'objet est à une distance plus grande que le double de la ance focale, l'image est plus petite que l'objet, et plus grande le cas contraire.

Enfin, dans les lentilles biconvexes, de même que dans les mi- concaves, la position de l'image est réciproque de celle de et; c'est-à-dire que celui-ci passant en *ab*, son image se forme AB (fig. 432).

34. Construction de l'image virtuelle dans les lentilles biconcaves. — Soit actuellement le cas où l'objet AB est placé entre la lle et son foyer principal F (fig. 434). Étant menés les axes ndaires AO et BO, le rayon incident AI, parallèle à l'axe prin- l, donne, après s'être réfracté deux fois vers l'axe, un rayon

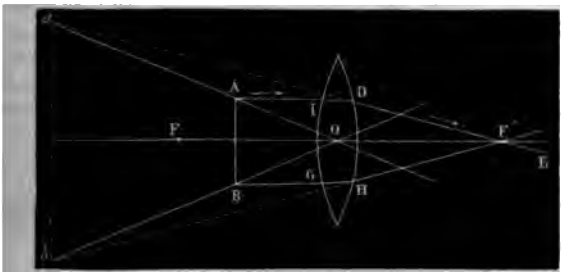


Fig. 434.

ngent DE qui va passer par le second foyer principal F', et t le prolongement rencontre l'axe secondaire OA en un point ui est le foyer virtuel de A. Le foyer virtuel de B se formant même en *b*, on a en *ab* l'image de AB. *Cette image est redres- virtuelle et plus grande que l'objet.*

es lentilles biconvexes, ainsi employées comme verres gros- ants, prennent le nom de *loupes* ou de *microscopes simples.*

35. Foyers dans les lentilles biconcaves. — Avec les lentilles ncaves, il ne se forme que des foyers virtuels, quelle que soit istance de l'objet. Soit d'abord un faisceau SS' de rayons pa- les à l'axe (fig. 435) : le rayon SI se réfracte au point d'inci- e I en s'approchant de la normale CI. Au point d'émergence l se réfracte de nouveau, mais en s'écartant de la normale GC', orte qu'il se brise deux fois dans le même sens pour s'éloi- de l'axe CC'. La même chose ayant lieu pour le rayon S'K,

les rayons, après avoir traversé la lentille, forment un faisceau divergent GHMN. Il ne peut donc y avoir de foyer réel; mais les

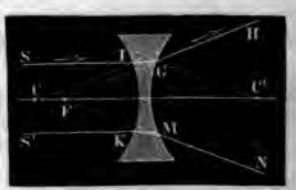


Fig. 435.

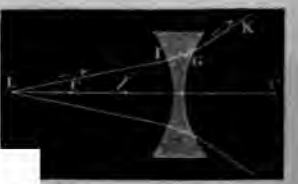


Fig. 436.

prolongements de ces rayons se rencontrent, sur l'axe principal, en un point F, qui est le foyer virtuel principal.

Dans le cas où les rayons partent d'un point L (fig. 436) situé sur l'axe, on trouve, par la même construction, qu'il se forme un foyer virtuel en *l*, lequel est entre le foyer principal et la lentille.

536. **Détermination expérimentale du foyer principal dans les lentilles biconcaves.** — Pour trouver le foyer principal d'une lentille biconcave, on recouvre une de ses faces de noir de fumée, en réservant, dans un même plan méridien et à égale distance de l'axe, en *a* et en *b* (fig. 437), deux petits cercles non noircis, qui laissent passer la lumière; puis, recevant sur l'autre face, parallèlement à l'axe, un faisceau de lumière solaire SS', on avance ou l'on recule l'écran P, qui reçoit les rayons émergents, jusqu'à ce que la distance des images projetées A et B soit double de *ab*. Négligeant l'épaisseur centrale de la lentille, l'intervalle DI est alors égal à la distance focale FD, d'après la similitude des triangles F*ab* et FAB.

Fig. 437.

537. **Construction des images dans les lentilles biconcaves.** — Les lentilles biconcaves, de même que les miroirs convexes, ne donnent que des images virtuelles, quelle que soit la distance de l'objet.

Soit, en effet, un objet AB (fig. 438) placé devant une pareille lentille. Tirant les axes secondaires AO et BO, tout rayon AI parallèle à l'axe principal se réfracte deux fois, en I et en E, pour

s'écarter de cet axe; et le rayon émergent ED, prolongé, allant passer par le foyer principal (528, 3°), le point a, où il coupe l'axe secondaire AO, est l'image virtuelle du point A. L'image du point B se construisant de la même manière en b, on a en ab l'image de AB, laquelle est toujours *virtuelle, redressée et plus petite que l'objet*. On ne peut la voir qu'en plaçant l'œil dans la direction du faisceau émergent; c'est-à-dire qu'elle est *aérienne*.

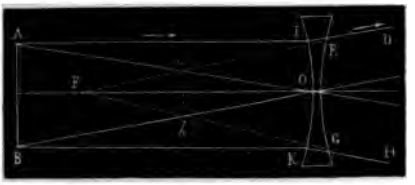


Fig. 438.

* 538. **Formules relatives aux lentilles.** — Dans toute lentille, on peut traduire en équation la relation qui existe entre la distance de l'image, celle de l'objet, les rayons de courbure et l'indice de réfraction. Soit d'abord une lentille biconvexe. P étant un point lumineux situé sur l'axe (fig. 439), soient PI un rayon incident, IE sa direction dans l'intérieur de la lentille, EP' le rayon émergent, en sorte que P' est le foyer conjugué de P. Soient encore C'I et CE les normales aux points d'incidence et d'émergence, et posons $IPA = \alpha$, $EP'A' = \beta$, $ECA' = \gamma$, $IC'A = \delta$, $NIP = i$, $EIO = r$, $IEO = i'$, $N'EP' = r'$.

Les angles i et r' étant extérieurs, l'un au triangle PIC', l'autre au triangle CEP', on a $i = \alpha + \delta$, et $r' = \gamma + \beta$, d'où $i + r' = \alpha + \beta + \gamma + \delta$ [1]. Or au

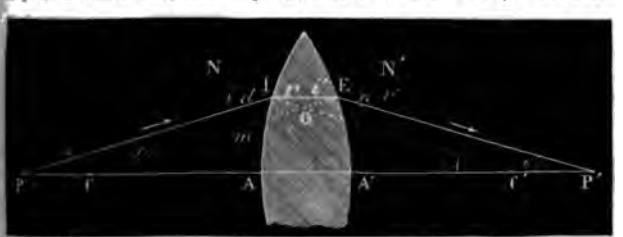


Fig. 439.

point I, on a $\sin i = n \sin r$, et au point E, $\sin r' = n \sin i'$ (514); mais en supposant l'arc AI d'un très-petit nombre de degrés, les angles i, r, i' et r' sont très-petits, et l'on peut remplacer, dans la formule ci-dessus, les sinus par leurs arcs, ce qui donne $i = nr$ et $r' = ni'$; d'où $i + r' = n(r + i')$. D'ailleurs, les deux triangles IOE et COC' ayant l'angle O égal, on a $r + i' = \gamma + \delta$, d'où $i + r' = n(\gamma + \delta)$. Portant cette valeur dans l'équation [1], il vient

$$n(\gamma + \delta) = \alpha + \beta + \gamma + \delta, \quad \text{ou} \quad (n - 1)(\gamma + \delta) = \alpha + \beta \text{ [2]}.$$

Cela posé, si l'on conçoit que les arcs α et γ soient décrits des points P et C comme centres avec un rayon égal à l'unité, et si du point P on décrit l'arc dA avec le rayon PA, on a les proportions $\frac{\alpha}{Ad} = \frac{1}{PA}$, et $\frac{\gamma}{A'E} = \frac{1}{CA}$; d'où l'on tire $\alpha = \frac{Ad}{AP}$ et $\gamma = \frac{A'E}{CA'}$, ou $\alpha = \frac{AI}{p}$ et $\gamma = \frac{A'E}{R}$, en posant $AP = p$, $CA' = R$, et en

$$(n-1)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right)=\frac{1}{p}+\frac{1}{p'} \quad [3].$$

Telle est la formule des lentilles biconvexes. Si l'on y fait $p=\infty$

$$\frac{1}{p'}=(n-1)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right),$$

p' désignant alors la distance focale principale. En représentant cell

on a $$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right) \quad [4],$$

équation dont il est facile de tirer la valeur de f. En ayant égard à la

la formule [3] prend la forme $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$ [5],

qui est celle sous laquelle on la considère ordinairement.

Lorsque l'image est virtuelle, p' change de signe, et la formule [

forme $$\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=\frac{1}{f} \quad [6].$$

Dans les lentilles biconcaves, p' et f conservent le même signe,

de p change; la formule [5] devient alors $\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{f}$ [7].

Si dans la formule [5] ci-dessus on fait $p=2f$, on trouve aussi p' =

à-dire qu'*un objet étant placé en avant d'une lentille biconvexe, à u*

double de la distance focale, l'image se fait de l'autre côté à la mêm

et, par conséquent, est de même grandeur.

Dans les lentilles biconvexes, les deux rayons de courbure R et R

nairement égaux. Si l'on introduit cette condition dans la formule [4

elle devient $\frac{1}{f}=(n-1)\times\frac{2}{R}$. Or pour les lentilles de crown, $n=$

tuant à n cette valeur, il vient $\frac{1}{f}=\frac{1}{2}\times\frac{2}{R}$, ou $\frac{1}{f}=\frac{1}{R}$; d'où $f=R$.

les lentilles de crown; *le foyer principal coïncide avec le centre de cou*

est sensiblement de même dans les lentilles de verre ordinaire; av

la distance focale est plus courte.

'*aberration de sphéricité par réfraction.* Les surfaces brillantes qui se alors dans l'espace par l'intersection des rayons réfractés se nomment *par réfraction.*

ation de sphéricité nuit à la netteté des images. On obvie à ce défaut es en plaçant au-devant des diaphragmes percés d'une ouverture cen- manière à laisser passer les rayons qui se présentent vers le centre, rêter ceux qui tendent à se réfracter vers les bords. Du reste, en com- ux lentilles de courbures convenables, on parvient aussi à détruire n de sphéricité, en rapprochant les rayons de l'axe.

Laryngoscope. — Nous donnons ici, comme application des lentilles, il nouvellement imaginé pour faciliter l'observation du larynx et des rties internes de la bouche. Quoique nouveau, cet appareil a déjà reçu

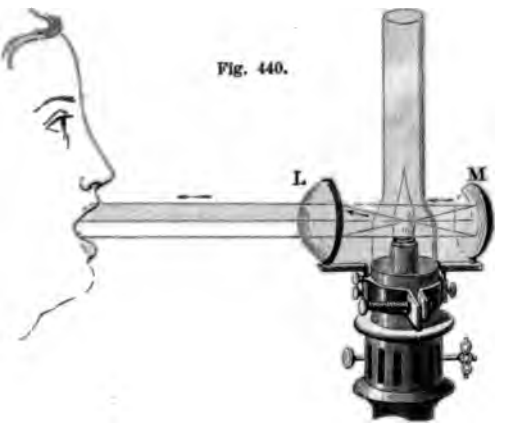


Fig. 440.

variées. Il se compose simplement d'un réflecteur concave, ou bien teur et d'une lentille convergente. Telle est la disposition adoptée par (fig. 440). L'appareil consiste en une lentille plan-convexe L et en un concave M, fixés tous les deux sur un collier de cuivre qui se monte mpe quelconque. La flamme de celle-ci coïncide avec le foyer princi- ntille, et, en même temps, avec le centre de courbure du réflecteur. e que le faisceau divergent parti de la lampe vers la lentille se change, , en un faisceau parallèle, et que le faisceau qui tombe sur le mi- nant sur lui-même au foyer de la lentille, va la traverser pour en n second faisceau parallèle qui se superpose au premier. En dirigeant ère dans la bouche d'un malade, toute la cavité en est fortement ; on peut en observer facilement les lésions.

CHAPITRE IV

DISPERSION ET ACHROMATISME

ecomposition de la lumière blanche, spectre solaire. — Le ne de la réfraction n'est pas aussi simple qu'on l'a sup-

Fig. 441.

faisceau de lumière solaire SA (fig. 441
verture pratiquée dans le volet. Ce faisc
K une image ronde et incolore du sole
sur son passage un prisme de flint-gla
ment, le faisceau, à l'entrée et à la sort
dans un plan vertical, et, au lieu d'une
on reçoit sur un écran éloigné une imag
tion horizontale, est de même dimension
mais oblongue dans le sens vertical, et c
de l'arc-en-ciel. Newton a donné à cette i
spectre solaire. Il existe en réalité, dans

stance dont le prisme est formé, ce que l'on constate à l'aide lyprisme décrit précédemment (fig. 412). Les substances qui ent plus d'étendue au spectre sont dites plus *dispersives*, et spersion se mesure par la différence des indices de réfraction ayons extrêmes du spectre. Pour le flint-glass cette différence ,0433; pour le crown-glass, elle est 0,0246; la dispersion du est donc presque double de celle du crown.

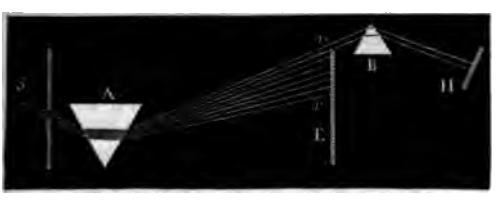
ar des prismes de même substance, la dispersion croît avec le réfringent du prisme, ce qu'on vérifie avec le prisme à angle ble déjà décrit (fig. 413). En faisant passer au travers de ce e un faisceau de lumière blanche, l'étendue du spectre aug- e à mesure qu'on fait diverger les deux glaces.

ns les spectres des lumières artificielles, on n'observe pas res couleurs que celles du spectre solaire, et leur ordre est le e; mais, en général, il en manque quelques-unes. Leur in- té relative est aussi très-modifiée. La nuance qui domine dans lumière artificielle est également celle qui domine dans son re. Les flammes jaunes, rouges, vertes, donnent des spectres teinte dominante est le jaune, le rouge, le vert.

ar produire un spectre solaire dont les sept couleurs prin- s soient bien séparées, l'ouverture par laquelle entre la lu- solaire ne doit avoir que quelques millimètres de diamètre, ngle réfringent du prisme étant de 60 degrés, l'écran sur l'on reçoit le spectre doit être éloigné de 5 à 6 mètres.

2. Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles. — Si l'on isole une des couleurs du spectre en inter- nt les autres au moyen d'un écran (fig. 442), et qu'on la

2.



passer à travers un second prisme B, on observe bien en- ne déviation, mais la lumière reste identiquement la même, -dire que l'image reçue sur l'écran H est violette, si l'on a passer le faisceau violet; bleue, si l'on a laissé passer le u bleu; d'où l'on dit que les couleurs du spectre sont *sim-* c'est-à-dire indécomposables par le prisme.

lus, les couleurs du spectre sont inégalement *réfrangibles*,

c'est-à-dire qu'elles possèdent des indices de réfraction différents. La forme allongée du spectre suffirait pour démontrer l'inégale réfrangibilité des couleurs simples; car il est évident que la couleur violette, qui dévie davantage vers la base du prisme (fig. 441), est aussi la plus réfrangible, et que la couleur rouge, qui dévie le moins, est la moins réfrangible. Mais on peut encore démontrer l'inégale réfrangibilité des couleurs simples par les expériences suivantes dues à Newton.

1° On colle sur un carton noir, l'une à la suite de l'autre, deux bandes étroites de papier, l'une rouge, l'autre violette; puis on les regarde à travers un prisme. On les voit déplacées toutes les deux, mais inégalement; la bande rouge moins que la violette; ce qui fait voir que les rayons rouges sont les moins réfractés.

2° On fait encore l'expérience des prismes croisés: sur un pre-

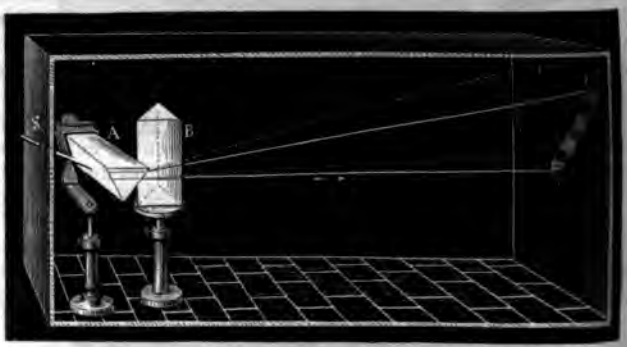


Fig. 443.

mier prisme A (fig. 443), disposé horizontalement, on reçoit un faisceau de lumière blanche S, qui, lorsqu'il ne traverse que le prisme A, va former le spectre *rv* sur un écran éloigné. Si l'on place alors, verticalement derrière le premier, un second prisme B, de manière qu'il soit lui-même traversé par le faisceau réfracté, le spectre est déplacé sur le côté du prisme vertical; mais au lieu de l'être parallèlement à lui-même, comme il arriverait si toutes les couleurs du spectre étaient réfractées également, il l'est obliquement en *r'v'*; ce qui fait voir qu'en allant du rouge au violet, les couleurs sont de plus en plus réfrangibles.

Ces diverses expériences montrent que l'indice de réfraction varie pour chaque couleur; en outre, il est à observer que tous les rayons d'une même couleur n'ont pas le même indice. En effet, dans

uge, par exemple, les rayons qui forment l'extrémité du
ont moins réfractés que ceux qui sont voisins de la zone
Dans les calculs des indices de réfraction (524), on est
le prendre pour indice d'une substance celui du rayon
s le spectre donné par cette substance.

Recomposition de la lumière blanche. — Après avoir dé-
à lumière blanche, il restait à reconnaître si l'on pouvait
aire en réunissant les différents faisceaux séparés par le
ette recomposition s'opère par plusieurs procédés :

on reçoit le spectre sur un second prisme de même angle
que le premier, et tourné en sens contraire, comme le
figure 445, ce dernier prisme réunit les différentes cou-
pectre, et l'on observe que le faisceau émergent E, pa-
faisceau S, est incolore.

reçoit le spectre sur une lentille biconvexe (fig. 444),
un écran blanc à son foyer, on y recueille une image

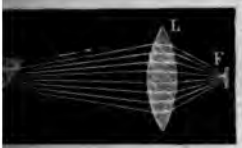


Fig. 444. Fig. 445.

u soleil ; un ballon de verre rempli d'eau produirait le
t que la lentille.

it tomber le spectre sur un miroir concave (fig. 446), et au
un écran de verre
e forme une image

recompose encore la
n recevant les sept
du spectre respecti-
ir sept petits miroirs

Fig. 446.

à faces bien paral-
r ne pas décomposer
, et pouvant s'incliner dans tous les sens pour porter la
éfléchie dans telle direction que l'on veut (fig. 447). En
convenablement ces miroirs, on fait d'abord tomber, sur
, par exemple, les sept faisceaux réfléchis, qui donnent
t images distinctes, rouge, orangée, jaune...; puis diri-
niroirs de manière que les sept images viennent exacte-
perposer, on obtient une image unique, qui est blanche.

5° Enfin, on démontre que les sept couleurs du spectr
du blanc, au moyen du disque de Newton. C'est un disq

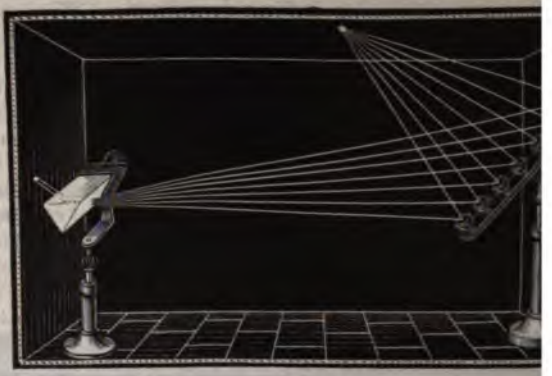


Fig. 447.

ton de 30 centimètres de diamètre environ ; le centre et
sont noirs, et dans l'intervalle sont collées des bandes

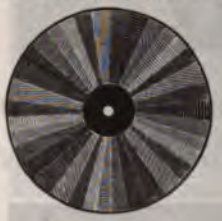


Fig. 448.

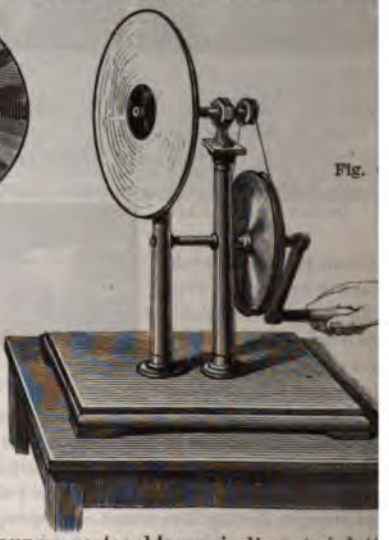


Fig.

rouges, orangées, jaunes, vertes, bleues, indigo et violett
du centre à la circonférence, de manière à imiter circul

ctres successifs par la nature des teintes et par leur éten-
tive (fig. 448). En imprimant à ce disque un mouvement
on rapide, la rétine reçoit simultanément l'impression
couleurs du spectre, et le disque paraît blanc (fig. 449),
oins d'un blanc gris, car les couleurs qui le recouvrent
as exactement celles du spectre.

**Théorie de Newton sur la composition de la lumière et sur
ur des corps.** — C'est Newton qui, le premier, décomposa
re blanche par le prisme, et la recomposa. Des diverses
ices que nous avons fait connaître ci-dessus, il conclut
umière blanche n'est pas homogène, mais formée de sept
s inégalement réfrangibles, qu'il nomma lumières *simples
ltices*, et que c'est en vertu de leur différence de réfran-
qu'elles sont séparées en traversant le prisme.

cette théorie, les corps décomposent aussi la lumière par
n, et leur couleur propre ne dépend que de leur pouvoir ré-
ant pour les différentes couleurs simples. Ceux qui les réflé-
t toutes, dans les proportions qu'elles ont dans le spectre,
nes; ceux qui n'en réfléchissent aucune sont noirs. Entre
x limites extrêmes se présentent une infinité de nuances,
que les corps réfléchissent plus ou moins certaines cou-
mples et éteignent les autres. En sorte que les corps ne sont
orés par eux-mêmes, mais par l'espèce de lumière qu'ils
issent. En effet, si dans une chambre obscure on éclaire
ivement un même corps avec chacune des lumières du spec-
corps n'a plus de couleur propre; ne pouvant réfléchir que
e de lumière qu'il reçoit, il paraît rouge, orangé, jaune...,
le faisceau dans lequel il est placé. La couleur des corps
ncore avec la nature de la lumière. C'est ce qui arrive pour
ère du gaz et des bougies, dans laquelle le jaune domine, et
mmunique cette teinte aux objets qu'elle éclaire.

Couleurs complémentaires. — Newton a nommé *couleurs
mentaires* celles qui, réunies, forment du blanc. Le vert
plémentaire du rouge, le bleu de l'orangé, le violet du
Toute couleur a sa couleur complémentaire; car, n'étant
nche, il lui manque quelques-unes des couleurs du spectre
rmer de la lumière blanche; le mélange de ces couleurs
ne en donner une complémentaire de la première.

Composition du spectre. — Newton n'a connu du spectre
partie colorée, la partie visible. Or la radiation qui consti-
spectre possède beaucoup plus d'étendue, et se compose
ité de trois parties douées de propriétés distinctes : 1° des
lumineux qui, agissant sur la rétine, constituent le spectre

rience de Draper. — D'après les expériences de F
d'Herschel, c'est dans le jaune qu'a lieu le maximu
de la lumière, et c'est dans le violet qu'a lieu le mi

La partie lumineuse du spectre, que nous considér
produit que dans de certaines limites d'ondulation
effet, on verra ci-après (621) que, pour le violet, l
ondulations s'élève à 728 millions de millions par sec
le rouge, à 496 millions de millions. Au-dessus et au-
limites, la radiation continue, mais de visible devi
c'est-à-dire qu'elle n'agit plus sur la rétine, phénomé
celui qu'on a observé dans la limite des sons perce

Remarquons encore que la composition de la par
spectre varie avec la température de la source de lu
le montre l'expérience suivante de M. Draper. Lorsqu
dans un fil de platine un courant électrique dont o
cessivement l'intensité, le fil s'échauffe de plus en
500 degrés, commence à devenir lumineux. Or, en
rayons à travers un prisme, on ne reçoit d'abord que
rouge; mais, l'intensité du courant continuant à cro
chauffe davantage, et, à la suite du rouge, on voit a
rangé. La température du fil s'élevant encore, aprè
montrent le jaune, puis le vert, le bleu, l'indigo et
ne prend naissance que lorsque le platine est chau

548. **Spectre calorifique, sa construction graphique**
reçoit un faisceau de lumière solaire sur un prisme
mieux de sel gemme, non-seulement la chaleur qu
le faisceau lumineux se réfracte avec lui, mais, com
nouit perpendiculairement aux arêtes du prisme,
ce qu'on nomme le *spectre calorifique*.

Cette expérience fait voir que, de même que la lu
mée de plusieurs espèces de rayons lumineux, la cha
posée de plusieurs espèces de rayons calorifiques
réfrangibles. Les différents rayons calorifiques n'
sibles, on ne peut les observer qu'à l'aide d'un

ısible. Pour cela, par une petite ouverture pratiquée dans t d'une chambre obscure, on reçoit un faisceau de lumière sur un prisme de sel gemme. Puis, de l'autre côté du , on place successivement, dans les différentes parties du ; et au delà, une pile de Melloni (fig. 256) assez étroite e recevoir que les rayons d'une même réfrangibilité.

ie reconnut le premier, avec son thermomètre différentiel, ans le spectre, la chaleur croît du violet vers le rouge; Herschel, qu'elle s'étend au delà du rouge. Ce dernier en maximum dans la bande obscure qui termine le rouge, et le fixa dans le rouge même. Cette différence a été expli- ar Seebeck, qui observa qu'elle dépendait de la nature du réfringent. Avec un prisme d'eau, il trouva le maximum e jaune; avec un prisme d'alcool, il l'observa dans le jaune ; et dans le rouge moyen, avec un prisme de crown. Mel- confirmé les expériences de Seebeck au moyen de son ther- ultiplicateur; il a trouvé que le maximum de chaleur s'é- d'autant plus du jaune vers le rouge, que la substance du est plus diathermane. Avec un prisme de sel gemme, le ium se forme tout à fait au delà du rouge.

représentant, par une droite donnée, l'étendue totale de la

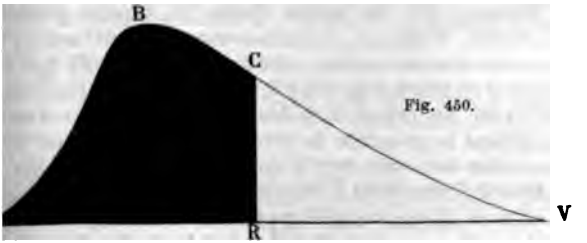


Fig. 450.

on calorifique dans le spectre, en élevant sur cette droite des diculaires sur lesquelles on porte l'intensité de la chaleur que point, et en joignant entre elles les extrémités de ces diculaires, Herschel a obtenu, avec un prisme de verre, urbe qui représente la distribution de la chaleur dans le solaire. M. Muller, à Fribourg, ayant répété cette expé- avec un prisme de sel gemme et avec des instruments récis, a obtenu la courbe ABCV (fig. 450). Dans cette figure, le VCR correspond, dans le spectre visible, à la radiation que, du violet jusqu'au rouge, et la partie noire RCBA à la radiation dans la partie obscure au delà du rouge. La thermique ABCV fait voir que le maximum de chaleur a

lieu en B, bien au delà du rouge; et que l'étendue totale du spectre calorifique est presque double de celle du spectre lumineux.

M. Tyndall, qui s'est livré aux mêmes recherches sur le spectre de la lumière électrique, a trouvé qu'avec cette source de lumière la courbe thermique s'élève au delà du rouge plus brusquement que dans le spectre solaire, et se prolonge beaucoup plus. Ce savant attribue l'infériorité de radiation calorifique du spectre solaire, par rapport au spectre électrique, à l'absorption de la chaleur solaire par la vapeur d'eau de l'atmosphère.

549. **Pouvoir chimique du spectre, expérience de Stokes.** — Dans un grand nombre de phénomènes, la lumière solaire se comporte comme un agent chimique. Par exemple, le protochlorure de mercure et le chlorure d'argent noircissent par l'action de la lumière; le phosphore diaphane devient opaque; les principes colorants d'origine végétale se détruisent. La lumière suffit même pour déterminer des combinaisons, comme il arrive avec un mélange de chlore et d'hydrogène; c'est elle, enfin, qui contribue principalement à la production de la matière verte dans les plantes. Toutefois les diverses couleurs du spectre ne possèdent pas la même action chimique. Scheele, le premier, en 1770, observa que le chlorure d'argent exposé à la lumière prend une teinte violacée, et il reconnut que les rayons violets du spectre produisaient seuls cet effet. Wollaston observa ensuite que cette action s'étendait hors du spectre visible, avec la même intensité que dans le violet, et il en conclut qu'outre les rayons qui agissent sur la rétine, il existe des rayons invisibles, plus réfrangibles. Les rayons qui possèdent la propriété de déterminer des réactions entre les éléments des corps ont reçu le nom de *rayons chimiques*.

M. Edmond Becquerel a découvert, en outre, dans le spectre, deux espèces de rayons qu'il appelle, les uns *rayons continateurs*, les autres *rayons phosphorogéniques*. Les premiers sont des rayons qui n'exercent point d'action chimique par eux-mêmes, mais qui ont la propriété de la continuer lorsqu'elle est commencée. Les rayons phosphorogéniques sont des rayons qui ont la propriété de rendre certains corps, le sulfure de baryum, par exemple, lumineux dans l'obscurité, lorsqu'ils ont été exposés quelque temps à la lumière solaire. Le spectre phosphorogénique s'étend depuis l'indigo jusque bien au delà du violet.

M. Stokes, à Cambridge, a complété l'étude des rayons chimiques, en faisant voir que les rayons ultra-violets, si réfrangibles que leur nombre d'ondulations dépasse la limite de visibilité (547), deviennent visibles par l'interposition de certains milieux, par exemple, les solutions de quinine, d'esculine, les verres

; la réfrangibilité est donc abaissée quand la lumière tra-
es substances.

yndall a observé le phénomène inverse pour les rayons
au delà du rouge : reçus dans le vide sur une lame d'é-
de charbon, et dans l'air ou dans le vide sur une feuille de
platinisé, c'est-à-dire recouvert de platine pulvérulent,
frangibilité est exaltée, et ils donnent une image visible.

Analogie entre la chaleur et la lumière. — Le spectre calorifique
mpagne le spectre lumineux montre une grande similitude entre la
et la lumière. Cependant, Melloni ayant fait voir que certaines sub-
comme le quartz, la glace pure, qui laissent très-bien passer la lumière,
perméables à la chaleur, surtout à celle émise de certaines sources, et
uartz enfumé, qui est fort peu transparent, est au contraire très-dia-
, il semble y avoir là un caractère distinctif entre la chaleur et la lu-
mais cette différence disparaît quand on a égard à la division de la cha-
chaleur obscure et en chaleur lumineuse.

t, en considérant d'abord la chaleur lumineuse, c'est-à-dire celle qui
dans la partie visible du spectre, et en expérimentant successivement
pt faisceaux d'un spectre obtenu avec un prisme de sel gemme, M. Ja-
Masson ont trouvé, à l'aide de la pile de Melloni, que les substances
ntes qui laissent passer toute la lumière, comme le sel gemme, le verre,
issent passer aussi toute la chaleur, en tenant compte des pertes occa-
par la réflexion à l'entrée et à la sortie. Les mêmes savants, étant ar-
même résultat en faisant passer les différents faisceaux du spectre à
s plaques de verres vert, bleu et violet, en ont conclu que, dans la
ineuse du spectre, *la chaleur et la lumière se transmettent toujours*
mêmes proportions à travers un milieu quelconque.

ts ne sont plus les mêmes avec la chaleur obscure, c'est-à-dire celle
ve au delà du rouge, ou qui est émise par une plaque de cuivre
00 degrés, ou par un cube de même métal rempli d'eau à 100 de-
En effet, tandis que le sel gemme laisse passer également toutes les
ures, comme l'avait trouvé Melloni (438), le verre, l'alun et, en
s les corps transparents et les substances translucides colorées, ar-
yons qui commencent à devenir obscurs. Enfin, le sel gemme, le
rtz, recouverts de noir de fumée, ne laissent plus passer la lu-
continuent à être traversés par les rayons calorifiques obscurs.

rayons chimiques, ou extra-violets, M. Ed. Becquerel a trouvé que
et le quartz les laissent passer tous, l'eau et le verre à un degré
que l'essence de térébenthine et surtout le bisulfate de quinine
rane les éteignent.

les expériences citées ci-dessus prouvent que les rayons calori-
t à fait comparables aux rayons lumineux; seulement certains
ts pour la lumière et pour la chaleur lumineuse ne le sont point
obscure, et réciproquement; d'où l'on doit conclure que c'est
é du spectre calorifique qu'il faut expliquer la différence qui se
tains cas, entre la chaleur et la lumière.

u spectre. — Les diverses couleurs du spectre solaire ne sont
Pour plusieurs degrés de réfrangibilité, les rayons manquent;
ans toute l'étendue du spectre, un grand nombre de bandes
tes qu'on nomme les *raies du spectre*. Pour les observer, on
le lumière solaire dans une chambre obscure, par une fente
distance de 3 à 4 mètres, on regarde cette fente à travers un
exempt de stries, en tenant les arêtes parallèles aux bords de

rand nombre de raies obscures très-déliées paral-
rès-inégalement espacées.
er, en 1802, signala les raies du spectre; mais c'est
1815, les étudia avec soin et en donna une des-
sin précis, dans lequel il indiqua par les lettres
E, *b*, F, G, H, les plus apparentes de ces raies,
ous le nom de *raies de Fraünhofer*. La raie A
est à la limite du rouge; B, au milieu; C, à la
; D, dans le jaune; E, dans le vert; F, dans le
dans le violet. Il y a encore d'autres raies re-
le rouge et *b* dans le vert. Avec la lumière so-
ns fixes, ce qui donne le moyen de mesurer avec
uleur simple. Dans les spectres formés par une
e des étoiles, la position relative des raies est
rique, les raies obscures sont remplacées par des
nes colorées, ou dans lesquelles se vaporisent cer-
s raies prennent des teintes éclatantes très-va-
tre, les unes sont constantes de position et d'éclat,
ofer; mais parmi les petites raies il en est dont
eur du soleil au-dessus de l'horizon et de l'état
sont dues au soleil; quant aux raies variables,
par l'air, et on les désigne sous le nom de raies
lluriques.
s le spectre plus de 600 raies plus ou moins larges
buées depuis le rouge jusqu'au violet. Sir David
s raies à 2 000. En recevant les rayons réfractés
urs prismes analyseurs, non-seulement on est ar-
raies, mais plusieurs qu'on regardait comme sim-

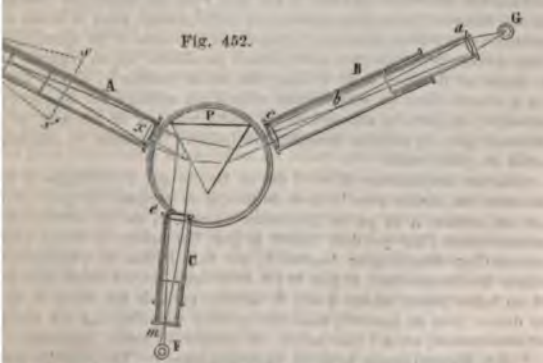
du spectre. — Après Fraünhofer, plusieurs phy-
s raies du spectre. Dès 1822, sir John Herschel
tances volatilisées dans une flamme fournissaient
onnaître la présence de tel ou tel corps par la
ux raies du spectre. Depuis, ces phénomènes ont
MM. Ed. Becquerel, Draper, Stokes, Wheatstone,
Plucker et Talbot; mais ce sont surtout Kirchhoff
fait connaître l'importante application que pr-
à l'analyse chimique, en constatant que tous les
ts dans une flamme produisent constamment des
position, tandis que les raies changent de [illegible]
chaque métal; et qu'enfin des quantités infini-
nt pour en déceler la présence. De là un nouveau
ne sous le nom d'*analyse spectrale*.
donne le nom de *spectroscope* à l'appareil qu'ont
ur étudier le spectre. Cet appareil est représenté
té modifié par MM. Duboscq et Grandeau. Il se
tées sur un pied commun, et dont les axes con-
isme de flint P. La lunette A peut seule tourner
par une vis de pression *n* dans la position qu'on
sert à *mettre au foyer*, c'est-à-dire à faire avoir
à ce qu'on voie nettement l'image du spectre (1[illegible]
oyen d'incliner plus ou moins la lunette.
ge des lunettes B et C, reportons-nous à la figure
e la lumière dans tout l'appareil. Les rayons [illegible]
une première lentille *a* qui les fait converger [illegible]

qui est le foyer principal d'une seconde lentille *c*. Par suite, c'est un allèle qui sort de la lunette B et qui entre dans le prisme. A la sor-

Fig. 451.

, la lumière est décomposée, et les sept faisceaux du spectre tom-
ntille *x*, qui en forme en *i* une image réelle et renversée. C'est enfin

Fig. 452.



e l'observateur regarde avec une loupe *z*, qui donne en *ss'* l'image
pectre, avec un grossissement d'environ huit fois.
unette C, elle sert à mesurer la distance relative des raies du spectre.

Pour cela, à son extrémité antérieure est un micromètre divisé en 250 parties égales. Pour obtenir ces divisions, on a une bande de papier sur laquelle est tracée une échelle de 250 millimètres avec la graduation de 10 en 10; puis, par la photographie, on prend de cette échelle une image sur verre, réduite à 15 millimètres de longueur, et *négative*, c'est-à-dire que le micromètre reproduit en clair, sur fond noir, l'image noire sur fond blanc de l'échelle. Le micromètre ainsi construit et placé en *m* à l'extrémité du tube C, se trouve correspondre au foyer principal d'une lentille *e*, qui, par suite, envoie sur le prisme un faisceau parallèle. Or une portion de ce faisceau, étant réfléchie sur la face du prisme, est renvoyée dans la lunette A, et y donne en clair, sur le spectre même, une image parfaitement nette du micromètre, laquelle donne le moyen de mesurer avec précision les distances relatives des différentes raies.

La lunette micrométrique est en outre munie de plusieurs vis de rappel *i*, *o*, *r*; la vis *i* est la mise au foyer; *o* sert à déplacer le micromètre latéralement dans le sens du spectre; et *r*, à incliner plus ou moins la lunette pour élever ou abaisser le micromètre.

Pour compléter la description du spectroscope, il nous reste à décrire l'ouverture par laquelle la lumière de la flamme G entre dans la lunette B. Elle consiste en une fente verticale étroite, qu'on ouvre plus ou moins en faisant marcher, à l'aide d'une vis de pression *v*, la pièce *a* (fig. 453), qui est mobile. Lorsqu'on veut observer simultanément deux spectres pour les comparer entre eux, on place à la partie supérieure de la fente un petit prisme *i* dont l'angle réfringent est de 60 degrés. Les rayons partis d'une flamme H tombent normalement sur une des faces du prisme, éprouvent la réflexion totale sur la deuxième, et, sortant perpendiculairement à la troisième, entrent dans la lunette suivant une direction parallèle à son axe. Puis une deuxième flamme G envoie un second faisceau, un peu au-dessous du petit prisme, dans la même direction que le premier; et ces deux faisceaux, traversant le prisme P du spectroscope (fig. 452), vont former deux spectres horizontaux parallèles, qu'on regarde avec la lunette A. Dans les flammes G et H sont des fils de platine *e*, *e'*. Ces fils ont été trempés d'avance dans les dissolutions salines des métaux sur lesquels on veut expérimenter; ou bien ils supportent de petits cristaux de ces sels, et c'est en se vaporisant que les métaux modifient la lumière transmise et donnent naissance à telles ou telles raies.

Fig. 453.

Chacune des flammes H et G est un bec de gaz d'éclairage. L'appareil qui les alimente est connu sous le nom de *lampe de Bunsen*. Le gaz arrive par le tube *t*, qui est creuse. A la partie inférieure de celle-ci est un orifice latéral destiné à laisser entrer l'air qui doit brûler le gaz. Cet orifice se ferme plus ou moins au moyen d'un diaphragme tournant, qui fait l'office de régulateur. Si on laisse entrer beaucoup d'air, le gaz brûle avec éclat, et les raies sont peu apparentes. Si on laisse passer moins d'air, la flamme perd de son éclat et bleuit. Alors elle ne donne plus de spectre; mais dès qu'on y introduit un sel métallique à l'état de dissolution, ou à l'état solide, le spectre du métal apparaît.

* 554. **Expériences avec le spectroscope.** — La planche coloriée ci-dessus montre quelques spectres observés à l'aide du spectroscope. La figure I représente le spectre solaire.

Le [illegible] est le spectre du potassium. Il est continu, c'est-à-dire continu

uverts par Kirchhoff et Bunsen au moyen de l'analyse spectrale. distingue par deux raies bleues, le second par deux raies rouges et par deux raies violettes moins intenses. Un troisième métal, été trouvé à l'aide de la même méthode par M. Crookes, en An- même temps, par M. Lamy, en France. Le thallium est carac- rale verte unique. Récemment un quatrième métal, l'indium, a le même procédé. Ce métal se distingue par une raie indigo. spectrale s'applique très-bien à tous les métaux alcalins. Pour les res sections, les expériences deviennent plus difficiles. Ces métaux t qu'à des températures très-élevées, il faut avoir recours à une ur plus intense que celle qu'on obtient avec la lampe de Bunsen. lle électrique ou de l'arc voltaïque qu'on fait alors usage. On ob- spectres parfaitement déterminés; mais ici la méthode devient e grand nombre de raies brillantes qu'on obtient. Avec le fer, n a 70 raies, et plusieurs autres métaux en donnent à peu près çoit que cette multiplicité de raies présente de grandes diffi- linguer certains métaux entre eux.

urs des objets vus au travers d'un prisme. — Lorsqu'un corps rs d'un prisme, les portions de son contour parallèles aux arêtes issent colorées des teintes du spectre. Ce phénomène s'explique trangibilité des rayons réfléchis par le corps. Si l'on regarde, par ande très-étroite de papier blanc collée sur un carton noir, avec les arêtes lui soient parallèles, elle paraît colorée de toutes les ctre, et c'est la teinte violette qui est la plus écartée vers le som- Dans cette expérience, la lumière blanche réfléchie par la bande décomposée à son passage dans le prisme, et la teinte violette, , dévie davantage, ce qui la fait paraître plus élevée.

papier, au lieu d'être très-étroite, a une certaine largeur, toute sa blanche; ses bords, parallèles aux arêtes du prisme, sont rapprochés du sommet en violet mélangé de bleu et d'in- chés de la base en rouge mélangé d'orangé et de jaune. omène, il faut concevoir la bande de papier partagée en

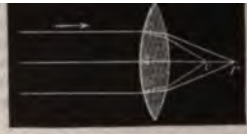


Fig. 454.

du spectre. Dans les lentilles con
exemple, les rayons rouges, qui
réfrangibles, vont former leur
point *r*, placé sur l'axe de la lent
tandis que les rayons violets, se
vantage, vont concourir en un
rapproché. Entre ces deux limi
les foyers orangé, jaune, vert, b
L'aberration de réfrangibilité est d'autant plus sensible, que les
plus convexes et que le point d'incidence des rayons qui les trav
éloigné de l'axe; car alors les faces d'incidence et d'émergence sont
entre elles. On va voir (557) comment on corrige l'aberration de r

* 557. **Achromatisme.** — En combinant des prismes dont les
gents sont différents (519), et qui sont formés de substances inéga
sives (541), on est parvenu à réfracter la lumière blanche sans l
Le même résultat s'obtient avec des lentilles de substances différe
courbures sont convenablement combinées. Les contours des objet
vers des prismes ou des lentilles ainsi formés ne paraissant plus
que ces prismes et ces lentilles sont *achromatiques*, et l'on non
tisme le phénomène de la réfraction de la lumière sans dispersion

En observant le phénomène de la dispersion des couleurs ave
d'eau, d'essence de térébenthine, de crown-glass, Newton avait
admettre que la dispersion était proportionnelle à la réfraction. Il
clu qu'il ne pouvait y avoir réfraction sans dispersion, et par c
l'achromatisme était impossible. Près d'un demi-siècle s'écoula avan
nût l'erreur de Newton. Hall, savant anglais, construisit le pren
des lunettes achromatiques; mais il ne publia pas sa découverte.
opticien à Londres, qui, en 1757, montra qu'en juxtaposant deux l
biconvexe, de crown-glass, et l'autre concave-convexe, de flint
obtenait une lentille sensiblement achromatique.

Pour expliquer ce résultat, soient deux prismes BCF et CFD juxta
nés en sens contraires, comme le montre la fig. 456. Si l'on suppos
ces prismes soient de même substance, l'angle réfringent CFD du

-dire que les rayons émergents EO sont sensiblement ramenés au parallé-
et donnent, par conséquent, de la lumière blanche. Toutefois, le rapport
gles BCF et CFD, qui convient au parallélisme des rayons rouges et des
violets, par exemple, n'étant pas celui qui convient aux rayons intermé-
, il en résulte qu'avec deux prismes on ne peut en réalité achromatiser
ux des rayons du spectre. Pour obtenir l'achromatisme parfait, il faudrait
ismes de substances inégalement dispersives et dont les angles réfringents
t convenablement déterminés.

55.

Fig. 456.

t à la réfraction, elle n'est pas corrigée en même temps que la disper-
r il faudrait pour cela que la puissance réfractive des corps variât, comme
supposé Newton, dans le même rapport que leur pouvoir dispersif; ce
pas lieu. Par conséquent, le rayon émergent EO ne sort pas parallèle-
rayon incident SI, et il y a déviation sans décomposition sensible.
entilles achromatiques se forment de deux lentilles de substances inéga-
dispersives. L'une A, de flint, est concave-convexe divergente (fig. 455);
B, de crown-glass, est biconvexe, et l'une de ses faces peut coïncider
avec la face concave de la première. Avec les lentilles, comme avec
, il faudrait sept verres pour obtenir l'achromatisme parfait; mais
dans tous les instruments d'optique, et on leur donne la courbure
pour achromatiser les rayons rouges et les rayons jaunes.

Absorption de la lumière par les milieux transparents. — On ne
pas de substance d'une transparence parfaite. Le verre, l'eau, l'air
signent graduellement la lumière qui les traverse, et, sous une épais-
, ces milieux peuvent l'affaiblir assez pour qu'elle n'agisse plus
. On observe, en effet, qu'un grand nombre d'étoiles qui ne sont pas
ne par le ciel le plus pur, quand on est dans les plaines, le devien-
on s'élève sur les hautes montagnes.

e graduelle qu'éprouve la lumière en traversant les milieux diapha-
e *absorption*. Si tous les rayons simples étaient également transmis-
ers les milieux diaphanes, ceux-ci seraient incolores. Or il n'en est
; ce qui montre que, comme les corps diathermanes ne se laissent
également par les différents rayons calorifiques (441), de même les
es laissent passer certains rayons lumineux plus facilement que
ilieu prend alors la couleur pour laquelle il est le plus diaphane.
te raison que, sous une grande épaisseur, l'air paraît bleu; une
paisse est verte. Le verre coloré en rouge par le protoxyde de cuivre
r que les rayons rouges, et absorbe tous les autres, même sous
seur.

s milieux transparents, la coloration varie avec l'épaisseur. Par
chlorure de chrome, qui est vert sous une faible épaisseur, de-
é sous une épaisseur plus grande. On nomme *polychroïques* les
la teinte varie ainsi avec l'épaisseur.

effet d'absorption que les rayons du soleil sont moins intenses
est à l'horizon que lorsqu'il est au zénith, car ils traversent
ur d'atmosphère bien plus considérable.

d'amplifier les images des corps que leurs petites dime
permettent pas d'observer à l'œil nu : ce sont les *mi*
2° Les instruments qui rapprochent et servent à observer
ou les objets éloignés : ce sont les *télescopes* et les *lunet*
instruments propres à projeter sur un écran des image
ou amplifiées, qui peuvent être utilisées dans l'art du
montrées à de nombreux observateurs; tels sont : la
claire, la *chambre obscure*, le *daguerréotype*, la *lan*
gique, la *fantasmagorie*, le *mégascope*, le *microscop*
et le *microscope photo-électrique*. Les deux premiers g
donnent que des images virtuelles, et le dernier des imag
excepté la *chambre claire*.

INSTRUMENTS QUI GROSSISSENT LES OBJE

560. **Microscope simple.** — Les *microscopes*, comme
dit ci-dessus, sont des instruments destinés à augmente
sance de la vue en grossissant les objets. On en distin
le *microscope simple*, et le *microscope composé*.

Le *microscope simple*, ou *loupe*, est simplement u
convergente à court foyer, avec laquelle on regarde
placés en deçà de son foyer principal. Quoique nous a
donné la construction de l'image ainsi
pétons ici pour y ajouter quelques détail

L'objet AB, que l'on veut observer, étan

La position et la grandeur de cette image ne sont point fixes; les varient avec la distance de l'objet au foyer. Par exemple, l'ob- t se rapprochant de la lentille, de AB en *ab*, l'angle des axes se- néaires augmente, et les rayons réfractés, prolongés, les coupent

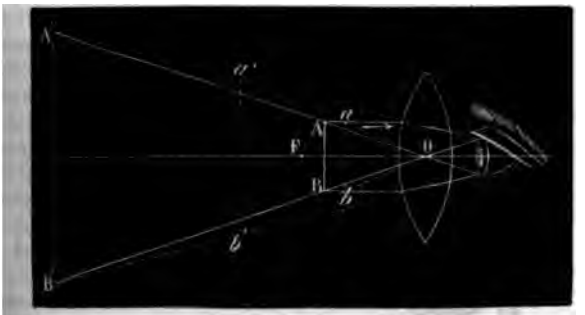


Fig. 457.

a'b'. L'image est donc plus petite et rapprochée. Au contraire, l'objet s'éloigne de la lentille, l'angle des axes secondaires di- inue, et leur intersection par les prolongements des rayons ré- actés ayant lieu au delà de A'B', l'image est plus éloignée et us grande. On peut donc toujours, en faisant varier la distance la lentille à l'objet, éloigner ou rapprocher l'image. On va voir après (561) que c'est à l'aide de cette propriété qu'on obtient la ité des images dans les microscopes et les lunettes.

Les aberrations de réfrangibilité et de sphéricité sont d'autant grandes dans le microscope simple, qu'il est plus grossissant. déjà vu (557) que l'aberration de réfrangibilité se corrige au

Fig. 458.

Fig. 459.

de lentilles achromatiques, et celle de sphéricité à l'aide phragmes qui ne laissent passer que les rayons voisins de rayons pour lesquels l'aberration de sphéricité est négli- (539). On corrige encore ce genre d'aberration en faisant non plus d'une seule lentille très-convergente, mais de petites lentilles plan-convexes superposées, leurs faces tournées vers l'objet qu'on regarde (fig. 459). Ces len- sont fixées dans un *œilleton* représenté en vraie grandeur, perspective et en coupe, dans les figures 458 et 459. Quoique

chacune d'elles soit moins convexe que la lentille simple remplacent, leur système grossit autant, mais avec une ab moindre, parce que la première rapproche de l'axe les ra tombent sur la seconde. Ce système de lentille est connu nom de *doublet de Wollaston*.

Pour faciliter l'emploi du microscope simple, M. Rasp donné la disposition représentée dans la figure 460. Un horizontal E, qui peut ou s'abaisser au moye crémaillère et d'un p bouton D, porte un noir m, au centre du enchâssée une lentill matique plus ou moi sissante. Au-dessous *porte-objet*, qui est sur lequel, entre deu de verre *b*, est plac qu'on veut observer. il est nécessaire que soit fortement éclairé çoit la lumière diffuse mosphère sur un ré concave de verre M incline de manière que les rayons réfléchis viennent tom l'objet. Pour se servir de ce microscope, on place l'œil t de la lentille, qu'on abaisse ou qu'on élève jusqu'à ce qu'o la position où l'image apparaît avec le plus de netteté.

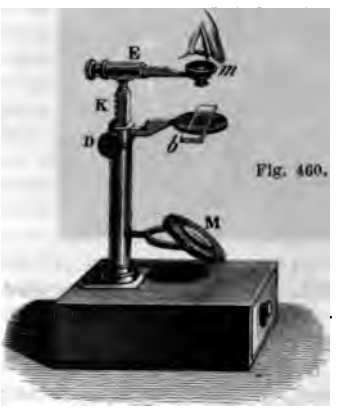


Fig. 460.

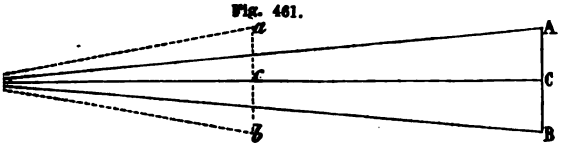
561. **Conditions de netteté, distance de la vue distincte.** que l'image des objets qu'on regarde dans le microscope p une grande netteté, il ne suffit pas que ces objets soien ment éclairés par un réflecteur concave, comme dans le scope de Raspail (fig. 460), il faut encore que l'image se une distance déterminée. En effet, on verra, en traitant d sion (593), qu'il est une distance à laquelle l'œil voit plu ment qu'à toute autre, et qu'à cause de cela on désigne nom de *distance de la vue distincte*. Elle varie avec les dus; mais pour un œil bien conformé, elle est comprise d limites de 25 à 30 centimètres. C'est donc à environ 25 centimètres de l'œil que doit se former l'image. D'où l'i que, pour chaque observateur, il faut *mettre au point*, c dire adapter le microscope à la distance de la vue distincte d qui observe, ce qu'on obtient en faisant varier très-peu la di

tille à l'objet; car on a vu ci-dessus (fig. 457) qu'un lé-
acement de l'objet en imprime un très-grand à l'image.

Diamètre apparent. — On nomme *grandeur apparente*, *
être apparent* d'un objet AB l'angle sous lequel on le
st-à-dire l'angle AOB (fig. 461), formé par deux rayons vi-
nés du centre de la pupille aux deux extrémités d'une
imension de l'objet.

es applications des diamètres apparents aux instruments

Fig. 461.



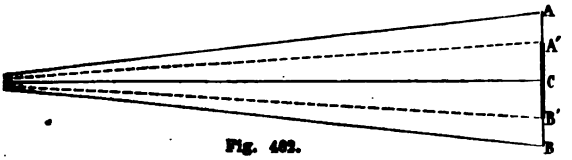


Fig. 462.

), les angles sous lesquels on voit les objets sont toujours
ités pour qu'on puisse, aux arcs qui mesurent ces angles,
r leurs tangentes. Le rapport de deux angles est alors le
celui de leurs tangentes. Ceci admis, il en découle les
ipes suivants, dont on va voir ci-après l'application à
du grossissement :

*ur un même objet, vu à des distances inégales, le dia-
pparent est en raison inverse de la distance à l'œil de
teur.*

*Pour deux objets, vus à la même distance, le rapport
ètres apparents est le même que celui des grandeurs*

, supposons que l'objet AB (fig. 461) soit transporté en *ab*, à une
ce, que Oc soit la moitié de OC. D'après un théorème connu de tri-
, les deux triangles rectangles ACO et *a*cO fournissent les égalités

$$\text{tang AOC} = \frac{AC}{CO}, \quad \text{et} \quad \text{tang } aOc = \frac{ac}{cO}.$$

C, et $cO = \frac{CO}{2}$; donc tang *a*Oc est double de tang AOC, et, par suite,

est double de AOC; donc, à une distance deux fois moindre, le dia-
ètre est deux fois plus grand. On trouverait de même qu'à une dis-
fois plus petite, il est triple, ce qui démontre le premier principe.

Pour démontrer le second, soient deux objets AB et A'B' (fig. 462) situés même distance de l'observateur, et supposons l'œil placé sur une droite OC pendiculaire sur le milieu de AB. Si l'on prend OC pour unité, les droites et A'C représentent immédiatement les tangentes des angles AOC et A'O a donc, d'après ce qui a été dit plus haut, $\frac{AOC}{A'OC} = \frac{AC}{A'C}$, ou, en doublant deux termes de chaque rapport, $\frac{AOB}{A'OB'} = \frac{AB}{A'B'}$, égalité qui est l'expressi deuxième principe énoncé ci-dessus.

563. **Mesure du grossissement.** — Dans le microscope si et dans les divers instruments d'optique, on entend par grossissement *le rapport du diamètre apparent de l'image au diam apparent de l'objet, supposés placés tous les deux à la m distance,* celle de la vue distincte. Mais, dans chaque instrum il importe de chercher une expression du grossissement facile à déterminer.

Considérant d'abord la loupe, soient AB l'objet qu'on obse et A'B' son image (fig. 463). Si l'on projette AB sur A'B' *a'b'*, le grossissement, d'après la définition qui précède, c

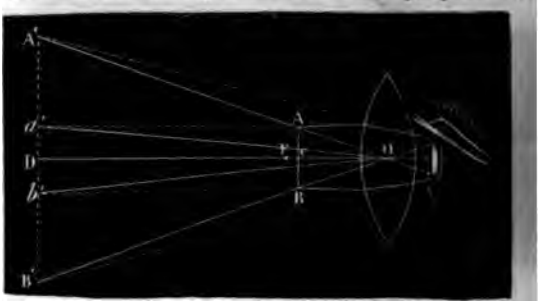


Fig. 463.

rapport des deux angles A'OB' et *a'Ob'*. Or on a vu (562) $\frac{A'OB'}{a'Ob'} = \frac{A'B'}{a'b'} = \frac{A'B'}{AB}$ [1], puisque *a'b'* = AB; mais A'B' est la g deur absolue de l'image, et AB celle de l'objet; donc on peut a dire que, dans le microscope simple, *le grossissement est le r port de la grandeur de l'image à celle de l'objet.*

Cela posé, les deux triangles semblables A'OB' et AOB fourn sent l'égalité $\frac{A'B'}{AB} = \frac{OD}{OC}$, dans laquelle OD est la distance d vue distincte *d*, et OC approximativement la distance focale *f* d lentille; on peut donc poser $\frac{A'B'}{AB} = \frac{d}{f}$; c'est-à-dire que, dans

pe simple, on a pour valeur approchée du grossissement
rt de la distance de la vue distincte à la distance focale le de la lentille. D'où l'on conclut que le grossissement
ınt plus fort : 1° que la lentille est à plus court foyer,
re qu'elle est plus convergente ; 2° que la distance de la
ncte de l'observateur est plus grande.
ntilles de rechange permettent de varier le grossisse-
ıis dans de certaines limites, si l'on veut conserver à
ɔute sa netteté : avec le microscope simple, on obtient
ssement très-net jusqu'à 120 fois en diamètre.
sissement qu'on vient de considérer est le grossissement
ire, ou le grossissement *linéaire.* Le grossissement *su-*
égale le carré du grossissement linéaire. Par exemple,
i est 20, le grossissement superficiel est 400. On verra
66) comment on détermine expérimentalement le gros-
. en diamètre.

Microscope composé. — Le *microscope composé*, réduit à
rand degré de simplicité, est formé de deux verres len-

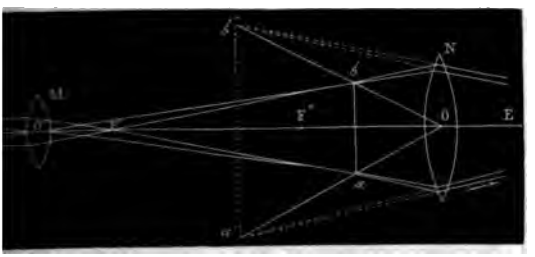


Fig. 464.

convergents, l'un à court foyer, nommé *objectif*, parce
ɔurné vers l'objet ; l'autre, qui est moins convergent, se
ulaire, parce qu'il est près de l'œil de l'observateur.
verres sont fixés dans un même tube, de manière que
. coïncident.
e 464 représente la marche des rayons lumineux et la
de l'image dans le microscope composé réduit à deux
ı objet AB étant placé très-près du foyer principal F de
M, mais un peu au delà par rapport à ce verre, une image
renversée et amplifiée, va se former de l'autre côté de
beaucoup au delà du second foyer principal F' (528, 2°).
ance des deux verres M et N est telle, que l'image *ab*
entre l'oculaire N et son foyer F''. Il en résulte que

pour l'œil placé en E, qui regarde cette image avec l'oculaire, ce dernier verre produit l'effet du microscope simple, ou loupe (534), et substitue à l'image AB une seconde image *a'b'*, virtuelle et amplifiée de nouveau. Cette deuxième image, droite par rapport à la première, est renversée par rapport à l'objet. On peut donc dire, en dernière analyse, que le microscope composé n'est autre chose qu'un microscope simple appliqué, non plus à l'objet, mais à son image déjà amplifiée par une première lentille.

565. **Microscope de Nachet.** — On a vu ci-dessus le principe du microscope composé; il reste à décrire cet appareil et ses principaux accessoires. Inventé vers la fin du XVIe siècle, il a reçu successivement de nombreux perfectionnements.

La figure 465 donne une vue perspective du microscope composé, tel qu'il est construit par M. Nachet, et la figure 466 une coupe longitudinale. Le corps du microscope se compose d'un système de tubes de cuivre DD', I et H, dont le premier porte, à sa partie inférieure, l'objectif *o*, et le dernier H, l'oculaire O. DD' est un seul et même tube dans lequel s'engage, à frottement doux, le tube I, tandis que le tube DD' peut glisser, aussi à frottement doux, dans un tube plus gros maintenu dans un collet E. Ce dernier est fixé à un support BB', qui, au moyen d'une vis à pas très-serrés, qu'on fait tourner par un bouton T, s'élève ou s'abaisse, avec une course de 6 millimètres, le long d'une tige intérieure C, qui n'est pas visible dans la figure. Avec la pièce BB' monte et descend tout le corps du microscope, ce qui permet de l'écarter ou de le rapprocher à volonté de l'objet qu'on observe. Enfin, la tige C et toutes les autres pièces de l'instrument sont portées par un axe horizontal A, sur lequel elles tournent à frottement assez dur pour pouvoir s'incliner et rester fixes dans toutes les positions, depuis la verticale jusqu'à l'horizontale.

Les objets qu'on veut observer se placent, entre deux lames de verre V, sur une plate-forme R, qui est le *porte-objet*. Celui-ci est percé, à son centre, d'un trou qui laisse passer la lumière envoyée par un réflecteur concave M : c'est un miroir de verre, monté à articulations, de manière qu'on puisse lui donner toutes les positions et inclinaisons pour que, recevant la lumière diffuse de l'atmosphère ou de toute autre source lumineuse, il la renvoie vers l'objet. Entre le réflecteur M et le porte-objet est un diaphragme K, percé sur son pourtour de quatre trous inégaux, et tournant librement autour d'un axe, de façon qu'on puisse amener à volonté chacun des trous au-dessous de l'ouverture centrale du porte-objet, et régler ainsi la lumière qui arrive à l'objet. On la règle encore en élevant ou en abaissant, au moyen d'un levier *n*, le di-

agme K, qui est mobile dans une coulisse. De plus, au-dessus diaphragme K est une pièce *m* sur laquelle on monte, à volé, ou un second diaphragme percé d'un très-petit trou et ne

Fig. 465.

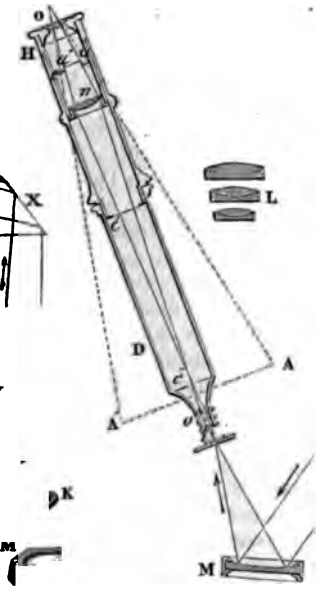


Fig. 466.

sant arriver que très-peu de lumière sur l'objet, ou une lentille convergente, qui concentre la lumière sur l'objet, ou un prisme oblique représenté en X. Les rayons qui arrivent du réflecteur subissent deux réflexions totales dans ce prisme, et sortent par une face lenticulaire qui les concentre latéralement sur l'objet, ce qui est avantageux dans certaines observations microscopiques. Les objets qu'on observe sont en général assez transparents pour qu'on les éclaire en dessous; dans le cas où leur opacité ne le permet pas, on les éclaire en dessus au moyen

Il résulte de cette disposition que, prenant la main la p
on peut la faire tourner, ainsi que le porte-objet et le
microscope, autour de l'axe optique de celui-ci. Pendant
vement, le réflecteur et les diaphragmes ne se déplac
mais les lames de verre V tournant avec la plate-forme I
se trouve successivement éclairé sur toutes ses faces
permet une observation plus complète.

La figure 466 montre la disposition des lentilles et la
des rayons dans le microscope. En *o* est l'objectif, co
trois petites lentilles achromatiques convergentes, repr
sur une plus grande échelle, en L, sur la droite de la fig
effets de ces trois lentilles s'ajoutant, leur système agit co
lentille unique très-convergente. L'objet étant placé en *i*
du foyer principal du système, mais au delà, les rayons é
vont tomber sur une quatrième lentille convergente *n*, d
voir ci-après l'usage (568 et 569). Devenus plus converg
leur passage à travers le verre *n*, les rayons vont form
une image réelle et amplifiée de l'objet *i*. Cette image s
entre un cinquième verre convergent O et le foyer princi
verre. Par suite, si l'on regarde à travers celui-ci, il agi
loupe (534) et donne, en AA', une image virtuelle et très
fiée de l'image *aa'*, et, par conséquent, de l'objet. Les de
n et O constituent l'oculaire, de mên
stituent l'objectif. On adapte à
oculaires de rechange, dont les
font varier le grossissement. Dans le microsc

pièce BB' et avec elle tout le microscope, jusqu'à ce que l'image AA' atteigne son maximum de netteté, ce qui a lieu quand elle se forme à la distance de la vue distincte, distance qu'on finit toujours par obtenir, car la lentille objective s'écartant ou se rapprochant de l'objet, l'image *aa'* s'écarte ou se rapproche de l'oculaire, et en même temps l'image AA' (528, 3°, et 560).

La manipulation ci-dessus constitue la *mise au point*. Dans le microscope, où la distance de l'objectif à l'oculaire est constante, la mise au point s'obtient en approchant ou écartant l'instrument de l'objet qu'on veut observer. Dans les lunettes et les télescopes, où les objets qu'on observe sont inaccessibles, elle s'obtient en faisant varier la distance de l'oculaire à l'objectif.

566. Micromètre, chambre claire, mesure du grossissement. — On nomme *micromètre* une petite lame de verre sur laquelle sont tracés, au diamant, de petits traits parallèles, distants les uns des autres de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre; et *chambre claire* un petit prisme de verre qui donne le moyen de suivre avec un crayon, sur une feuille de papier, le contour des images vues dans le microscope, et permet ainsi d'en prendre une copie fidèle. En combinant la chambre claire et le micromètre, on détermine facilement le grossissement, c'est-à-dire *le rapport de la grandeur absolue de l'image à celle de l'objet* (563).

Ce grossissement, dans le microscope composé, est le produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire. En effet, si l'on se reporte à la figure 464, le grossissement de l'objectif est $\frac{ab}{AB}$, et celui de l'oculaire $\frac{a'b'}{ab}$. Or le produit de $\frac{ab}{AB}$ par $\frac{a'b'}{ab}$ est $\frac{a'b'}{AB}$, qui est bien le grossissement total.

En s'appuyant sur les principes relatifs aux diamètres apparents (562), on pourrait exprimer le grossissement $\frac{a'b'}{AB}$ en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire, et des distances de l'objet et de l'image à ces deux verres; mais il est préférable de le déterminer expérimentalement, à l'aide du micromètre et de la chambre claire. On a donné à cette dernière différentes formes (577). La suivante, due à M. Nachet, consiste en un prisme oblique *ab*, de crown, tronqué en *c* (fig. 468). Fixé sur une monture de cuivre percée sur les faces inférieure et supérieure, le prisme se place sur l'oculaire du microscope, comme le montre la figure 467. Une feuille de papier P étant posée auprès de l'instrument, une pointe de crayon A, appuyée sur le papier, envoie vers le prisme un faisceau de lumière qui

entre normalement à la face *c*, subit une première réflexion totale sur la face *bc*, une deuxième sur la face *a*, et de là arrive à l'œil comme s'il sortait du microscope. En *a* est un petit prisme rectangle appliqué sur le premier prisme avec du baume de Canada, qui est transparent et dont l'indice de réfraction surpasse peu celui du crown. Les rayons qui émergent de l'oculaire *o*, traversant ainsi un milieu à faces parallèles, arrivent à l'œil sans déviation; l'observateur voit donc simultanément, dans le microscope, le crayon et l'image des objets, et peut sans difficulté suivre les contours de celle-ci avec le crayon. Toutefois il importe que l'image du crayon et celle des objets qu'on observe se fassent toutes les deux à la même distance, celle de la vue distincte.

Pour mesurer le grossissement à l'aide de la chambre claire ci-dessus, on place sur le porte-objet le micromètre, que nous supposerons divisé en centièmes de millimètre, puis on reçoit, à la chambre claire, l'image des divisions du micromètre sur un papier qui porte une échelle en millimètres. Si l'on observe alors que 10 divisions du micromètre recouvrent sur le papier une longueur de 120 millimètres, on en conclut que l'image d'une seule

Fig. 467.

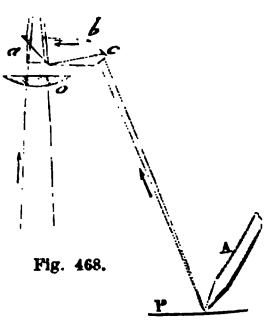


Fig. 468.

division du micromètre a une grandeur de 12 millimètres. Divisant 12 par $\frac{1}{100}$, c'est-à-dire la grandeur absolue de l'image par celle de l'objet, le quotient 1200 est le grossissement.

Réciproquement, une fois le grossissement connu, on en déduit la grandeur absolue des objets en divisant la grandeur absolue de l'image, prise à la chambre claire, par le grossissement.

On obtient encore la grandeur absolue des objets sans chambre claire, à l'aide de deux micromètres, l'un, divisé en centièmes de millimètre, qu'on pose sur le porte-objet, l'autre, à divisions arbitraires, mais égales, qu'on place entre les deux verres de l'oculaire en *b* (fig. 465). On l'introduit dans le tube H par une ouverture

le, et une vis de rappel *c* sert à l'élever ou à l'abaisser pour se au point; on tourne ensuite le tube H sur lui-même pour ler parallèlement les deux micromètres, puis on le fixe en nt la vis de pression *d*. Observant alors les micromètres, on e, par exemple, que 12 divisions du micromètre posé sur le -objet couvrent 4 divisions du micromètre supérieur; à e division du second correspondent donc 3 divisions du pre- c'est-à-dire $\frac{3}{100}$ de millimètre. Cela posé, substituant au mètre inférieur l'objet dont on veut avoir la grandeur, et rant de nouveau, si l'image de l'objet correspond à 10 divi- du micromètre supérieur, on en conclut que la dimension vée est 10 fois $\frac{3}{100}$ de millimètre, ou $0^{mill},3$.

7. Microscope binoculaire de Nachet. — Le microscope qui

Fig. 470.

rit, ainsi que tous ceux construits avant lui, est 'est-à-dire qu'on y observe les objets avec un seul

œil. Or on verra bientôt, en traitant du stéréoscope (595), que c'est la vision avec les deux yeux qui nous fait percevoir le relief des corps. Le microscope monoculaire ne peut donc nous donner des objets qu'un aspect qui nous expose à de fréquentes illusions, que tendent encore à augmenter l'éclairage de bas en haut et l'ignorance où l'on est le plus souvent de la structure des objets soumis à l'observation. C'est pour obvier à cet inconvénient que M. Nachet a construit le microscope binoculaire.

La figure 469, tirée du catalogue de M. Nachet, montre ce microscope, qui est à deux corps, l'un vertical, l'autre incliné; chacun a son oculaire, mais il n'y a qu'un objectif pour les deux. L'objet étant en *i* et l'objectif en *o*, le faisceau presque parallèle qui sort de l'objectif est divisé en deux portions égales par un prisme rectangle A (fig. 470) : la moitié de droite arrive directement à l'oculaire O du corps vertical, tandis que la moitié de gauche, après une première réflexion totale sur la grande face du prisme A et une deuxième sur un second prisme B, émerge suivant le corps oblique vers l'oculaire O'. Or, l'angle des deux tubes étant le même que l'angle optique CiC' (590) si les deux yeux, placés en C et en C', regardaient directement l'objet, chaque œil voit celui-ci exactement sous le même point de vue que s'il le regardait, grossi, sans microscope; d'où résulte la perception nette du relief.

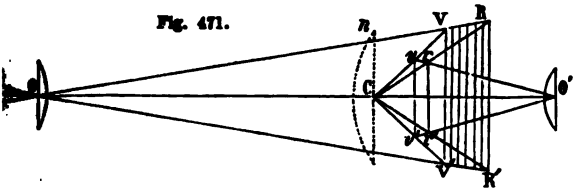
568. **Achromatisme du microscope, oculaire de Campani.** — Dans le microscope composé réduit à deux verres, comme on l'a supposé dans la figure 464, non-seulement il se produirait une forte aberration de sphéricité, mais les images seraient irisées sur les bords par un effet de dispersion (556), et le seraient d'autant plus, que le microscope serait plus grossissant. C'est pour corriger ces aberrations que l'objectif et l'oculaire ne sont pas simples, mais composés de plusieurs verres, comme le représente la figure 466, dans laquelle l'objectif est formé de trois petites lentilles achromatiques, et l'oculaire de deux lentilles *n* et O, dont la première suffit seule pour produire l'achromatisme, lorsque le microscope n'est pas très-grossissant.

En effet, soient *ab* l'objet qu'on observe, O l'objectif et O' l'oculaire (fig. 471), et supposons que le verre *n* ne soit pas encore interposé entre O et O'. Les rayons partis du point *b*, par exemple, étant plus ou moins dispersés à leur passage dans l'objectif, les rayons rouges vont former leur foyer en R sur l'axe secondaire du point *b*; tandis que les rayons violets, plus réfrangibles, vont concourir en V, plus près de la lentille; puis les cinq autres faisceaux du spectre entre R et V; la même chose de V' à R' pour les rayons partis de *a*. Si l'on regarde actuellement, à travers l'oculaire O', les

[redacted]

ones colorées VV'RR', les couleurs se superposant dans la
centrale, celle-ci paraît blanche, tandis que les bords sont
en rouge et en orangé; mais qu'on interpose la lentille *n*,
coloration disparaît. En effet, ayant tiré les axes secondaires
CR', CV et CV', les rayons rouges, à leur sortie de la lentille *n*,
former leur foyer en *r* et *r'*, sur les axes secondaires CR et

Fig. 471.

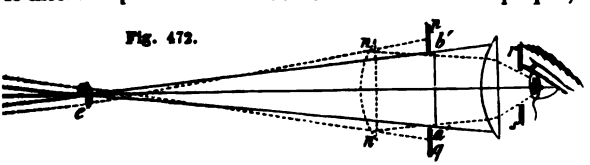


et les rayons violets en *v* et *v'*, plus près de la lentille. Or,
mbinant convenablement les courbures des lentilles *n* et O',
en conservant à la dernière une distance telle, que l'image
toujours à la distance de la vue distincte, on arrive à ob-
que les foyers *v* et *r* soient en ligne droite avec le centre
de l'oculaire. Les autres faisceaux colorés formant d'ail-
leurs foyers très-sensiblement sur la ligne *vr*, lorsqu'on re-
à travers l'oculaire les sept faisceaux, ceux-ci étant vus
le même angle, il y a recomposition de la lumière, et toute
cesse.

verre *n*, qu'on nomme *lentille de champ*, ou *oculaire de*
ami, produit donc l'achromatisme. De plus, en rapprochant
de l'axe, il diminue l'aberration de sphéricité; enfin,
voir qu'il augmente encore le *champ* du microscope.

Champ dans les instruments d'optique, point oculaire. —
le microscope et dans les autres instruments d'optique, le

Fig. 472.



p est l'espace angulaire dans lequel sont compris tous les
visibles à travers l'oculaire. Il est limité par la surface co-
qui a pour sommet le centre optique de l'objectif, et pour
ouverture du diaphragme *pq* placé en avant de l'oculaire
72). En prolongeant cette surface de l'autre côté de l'objectif,
, on détermine la partie visible de l'objet AB, ou le *champ*.
jet dépassant les limites du champ, la figure montre qu'on

petit, et plus est resserré le faisceau qui le traverse.
sition de l'œil a aussi de l'influence sur l'étendue d
effet, à leur sortie de l'oculaire, il y a un point où le
converger, c'est le *point oculaire*. C'est là que doit ê
pour embrasser tout le champ. Plus près ou plus loi
vrait qu'une partie des rayons émergents. Pour fix
de l'œil, on place en avant de l'oculaire un *œilleton*
d'une ouverture centrale, de manière que l'œil placé
ouverture se trouve juste au point oculaire.

570. **Applications du microscope.** — Le microsc
source des découvertes les plus intéressantes en h
zoologie, en physiologie. Des animaux dont l'existenc
jusqu'alors inconnue ont été observés dans le vina
pâte de farine, dans les fruits et les fromages secs;
et les globules du sang sont devenus visibles. Le mi
aussi de nombreuses applications dans l'industrie. I
il donne les moyens de reconnaître les différentes e
cules, les falsifications trop souvent introduites dan
dans les chocolats, etc.; il permet encore de const
étoffes la présence du coton, de la laine, de la soie

INSTRUMENTS QUI RAPPROCHENT LES O

571. **Lunette astronomique.** — La *lunet*
destinée à l'observation des astres. Réduite
pression, elle se compose, de même que le

loignés, il importe que l'objectif soit à grand diamètre en même emps qu'à grand rayon de courbure. Par la première condition, l reçoit plus de lumière de l'astre qu'on observe, et par suite

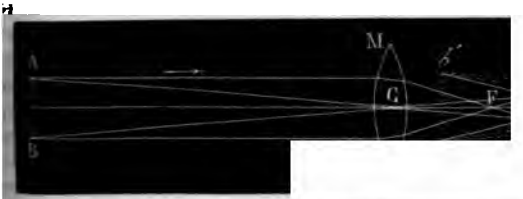


Fig. 473.

donne une image plus nette; par la seconde, l'aberration de sphéricité est moindre, et le grossissement plus fort. En effet, l'angle ACB étant constant quel que soit le rayon de courbure de l'objectif,

Fig. 474.

ce rayon est grand, plus le foyer est éloigné; par suite, plus première image *ab* est grande, et, par conséquent, l'image *a'b'*. figure 474 représente une lunette astronomique montée sur . Elle se compose d'un long tube de laiton, noirci à l'intér, afin de détruire toute réflexion qui renverrait vers l'oculaire tres rayons que ceux qui viennent de l'astre qu'on observe. xtrémité la plus large est l'objectif, qui est à grand diamètre et

achromatique. A l'autre extrémité est un tube *m*, court et à petit diamètre, dans lequel est l'oculaire. Ce tube peut s'enfoncer plus ou moins dans un tube plus fort fixé au corps de la lunette, ce qui donne le moyen de rapprocher ou d'écarter l'oculaire de l'image *ab* fournie par l'objectif (fig. 473). On obtient ainsi la mise au point en portant à la distance de la vue distincte l'image virtuelle *a'b'*. Pour les presbytes, on tire l'oculaire davantage; on l'enfonce pour les myopes. Quant à la composition de l'oculaire, elle est la même que dans le microscope composé : un premier verre remplissant l'office d'oculaire de Campani, et un deuxième celui de loupe. L'image qu'on obtient est renversée; mais cela ne présente aucun inconvénient pour l'observation des astres.

Au-dessus du tube principal est une petite lunette *a* qu'on nomme *chercheur*. Les lunettes d'un grand pouvoir amplifiant, ayant peu de champ (569), ne sont pas d'un usage commode pour chercher un astre; c'est pourquoi on regarde d'abord avec le chercheur, qui grossit moins, mais qui a plus de champ; on observe ensuite avec la lunette, dont l'axe est parallèle à celui du chercheur.

572. **Réticule, axe optique, grossissement.** — Pour fixer avec précision la position d'un astre à un instant déterminé, on ajoute à la lunette astronomique un *réticule*. On nomme ainsi deux fils d'araignée tendus en croix sur un diaphragme percé d'une ouverture centrale (fig. 475), et l'on appelle *axe optique*, ou *ligne de visée* de la lunette, la droite qui joint le point de croisement des fils au centre optique de l'objectif. Le réticule est placé au foyer même de l'objectif. En déplaçant latéralement le point de croisement des fils, on déplace l'axe optique; mais, en général, on fait coïncider cet axe avec l'axe géométrique de la lunette, et pour déterminer un point, on dirige celle-ci de manière que l'image du point vienne se former exactement au point d'intersection des fils du réticule.

Fig. 475.

Le grossissement étant le rapport du diamètre apparent sous lequel on voit l'astre dans la lunette à celui sous lequel on le voit à l'œil nu, il est représenté par le rapport de l'angle $b'Oa'$ ou bOa, sous lequel on voit l'image, à l'angle $bCa = ACB$, sous lequel on voit l'astre à l'œil nu (fig. 473); car, vu la distance de l'astre, son diamètre apparent est le même, que l'œil soit en C ou en O. Or on sait (562, 1) que les angles bOa et bCa, qui correspondent à la même dimension ba, sont en raison inverse des distances de *ab* aux points O et C, ou en raison inverse de OF et CF, puisque *ab* est très-voisin de F; donc $\frac{bOa}{ACB} = \frac{CF}{OF}$. C'est-à-dire que, dans la lunette astro

ossissement a pour mesure le rapport de la distance jectif à celle de l'oculaire, en admettant que les deux dent. Il est donc d'autant plus fort, que l'objectif est rgent et que l'oculaire l'est davantage.

longueur de la lunette, elle égale la somme des dis- de l'oculaire et de l'objectif, c'est-à-dire CF + FO lsque les foyers des deux verres sont sensiblement ette est donc d'autant plus longue, que la distance jectif est plus grande. Dans une bonne lunette, le ne dépasse pas 1000, et la longueur de l'instru- alors 8 mètres.

tte terrestre. — La *lunette terrestre*, ou *longue-vue*, la lunette astronomique que parce que les images ies, ce qui s'obtient à l'aide de deux verres conver- (fig. 476), placés entre l'objectif et l'oculaire. L'objet en AB, à une plus grande distance que ne peut le e dessin, son image va se former, renversée et très- , au delà du foyer de l'objectif. Or la seconde lentille istance telle, que son foyer principal coïncide avec en résulte que les rayons lumineux qui passent en *b* rès avoir traversé la lentille P, une direction paral- secondaire *b*O (528, 2°). De même les rayons qui

Fig. 476.

prennent une direction parallèle à l'axe *a*O. Après en H, ces divers rayons traversent une troisième len- le foyer principal coïncide avec le point H. Le faisceau concourir en *b'* sur un axe secondaire O'*b'* parallèle à le faisceau A*a*H allant de même concourir en *a'*, il *a'b'* une image redressée de l'objet AB. C'est cette regarde, de même que dans la lunette astronomique, dire convergent R, placé de manière qu'il se comporte oupe, c'est-à-dire que sa distance à *a'b'* soit moindre ce focale principale ; d'où il résulte qu'il donne en ge virtuelle, droite et amplifiée de *a'b'*.

s P et Q, qui ne servent qu'à redresser l'image, sont n tube de cuivre, à une distance constante, égale à leurs distances focales principales; mais l'objectif

M est mobile dans un tube, et peut s'approcher ou s'écarter de la lentille P, afin que l'image *ab* vienne toujours se former au foyer de cette lentille, quelle que soit la distance de l'objet qu'on regarde. La distance de la lentille R peut aussi varier, afin que l'image *a''b''* se fasse à la distance de la vue distincte. C'est pour obtenir ce double résultat que les différents verres ne sont pas fixés dans un même tube, sauf les lentilles P et Q, mais dans des tubes distincts, qui glissent à frottement doux les uns dans les autres.

La lunette terrestre peut servir comme lunette astronomique; mais il faut pour cela un oculaire de rechange, celui-ci devant être plus grossissant dans la dernière lunette que dans la première. Toutefois les astronomes préfèrent la lunette à deux verres, parce qu'elle absorbe moins de lumière.

Dans la lunette terrestre, le grossissement est le même que dans la lunette astronomique, en supposant toutefois que les verres redresseurs P et Q soient de même convexité.

574. **Lunette de Galilée.** — La *lunette de Galilée*, ou *lunette de spectacle*, est la plus simple des lunettes; car elle ne se compose que de deux verres, un objectif convergent M et un oculaire divergent N (fig. 477), et donne immédiatement une image redressée.

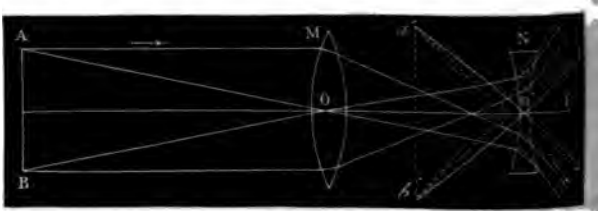


Fig. 477.

L'objet étant représenté par la droite AB, son image tend à aller se former en *ba*, renversée, réelle et plus petite; mais en traversant l'oculaire N placé entre l'objectif et son foyer, les rayons émis des points A et B se réfractent en s'écartant respectivement des axes secondaires *b*O' et *a*O' des points *b* et *a* de l'image. Il en résulte que ces rayons, prolongés en sens contraire de leur direction, vont concourir sur ces axes en *a'* et en *b'*; l'œil qui les reçoit voit donc en *a'b'* une image droite et amplifiée, qui paraît plus rapprochée parce qu'elle est vue sous un angle *a'*O'*b'* plus grand que l'angle AOB sous lequel on aperçoit l'objet. Quant au grossissement, de même que dans la lunette astronomique, il a pour va-

leur approchée le rapport de la distance focale de l'objectif à celle de l'oculaire. En effet, le grossissement égale $\frac{a'O'b'}{AOA} = \frac{bO'a}{bOa} = \frac{OF}{O'F}$ (562, I), en admettant que les foyers de l'oculaire et de l'objectif coïncident. Il découle de là que l'écartement des deux verres est la différence de leurs distances focales, et par suite que la lunette de Galilée est très-courte et très-portative. Elle a l'avantage de faire voir les objets dans leur véritable position, et, de plus, n'ayant que deux verres, elle absorbe peu de lumière; mais, à cause de la divergence des rayons émergents, elle a peu de champ, et il est nécessaire de placer l'œil très-près de l'oculaire. Celui-ci est placé dans un tube à tirage, afin d'être approché ou écarté de l'objectif, jusqu'à ce que l'image *a'b'* se forme à la distance de la vue distincte.

La lunette de spectacle, ou *jumelles*, est la même que celle ci-dessus; seulement elle est double, afin de former une image dans chaque œil, ce qui augmente l'éclat et donne le relief (594).

La lunette de Galilée a été la première dirigée vers les astres. C'est avec elle que cet illustre astronome découvrit les montagnes de la lune, les satellites de Jupiter et les taches du soleil.

L'époque de l'invention des lunettes n'est pas connue. Les uns en attribuent la découverte à Roger Bacon, dans le XIIIe siècle; les autres, à J.-B. Porta, à la fin du XVIe; quelques-uns, enfin, à Jacques Métius, Hollandais, qui aurait trouvé par hasard, vers 1609, qu'en combinant deux verres, l'un concave, l'autre convexe, on voyait les objets plus grands et plus rapprochés.

575. **Télescopes.** — Les *télescopes* sont des instruments qui servent à voir les objets éloignés, et particulièrement les astres. La lunette astronomique et la lunette de Galilée sont donc des télescopes. Elles ont, en effet, d'abord porté ce nom, et se désignaient sous celui de *télescopes par réfraction* ou *télescopes dioptriques*; mais aujourd'hui on entend par télescopes des appareils dans lesquels la réflexion est utilisée, en même temps que la réfraction, au moyen de miroirs et de lentilles, pour montrer les objets éloignés. On a construit plusieurs sortes de télescopes : les plus connus sont ceux de Gregory, de Newton et d'Herschel.

1° *Télescope de Gregory.* — La figure 478 représente ce télescope monté sur un pied sur lequel il peut tourner et s'incliner plus ou moins; la figure 479 en donne une coupe longitudinale. Le télescope, inventé vers 1650, se compose d'un long tube de [illegible]; l'un des bouts est fermé par un grand miroir concave M, [illegible], percé d'une ouverture centrale dans laquelle passent les [illegible] qui se rendent à l'oculaire. Près de l'autre extrémité est

un second miroir concave N, aussi de métal, un peu que l'ouverture centrale du grand miroir, et d'un rayo bure beaucoup plus petit que le sien. Les axes des mi cident avec celui du tube. Le centre de courbure du

Fig. 478 (h = 0m,70).

en O et son foyer en *ab*, les rayons tels que SA, venant se réfléchissent sur ce miroir et vont former en *ab* une versée et très-petite de l'astre. Or la distance des miro courbures respectives sont telles, que cette image se t

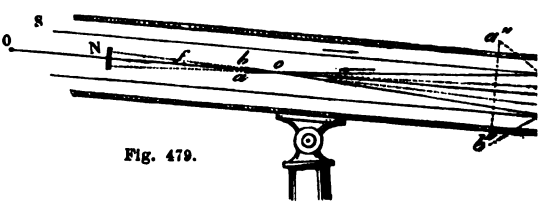


Fig. 479.

le centre *o* et le foyer *f* du petit miroir; d'où les ray s'être réfléchis une seconde fois sur le miroir N, vont *a'b'* une image amplifiée et renversée de *ab* (500), et, quent, droite par rapport à l'astre. Enfin, on regarde avec un oculaire P, à un ou à deux verres, qui a po l'amplifier de nouveau, et qui la fait voir en *a''b''*.

objets qu'on observe n'étant pas toujours placés à la même ce, le foyer du grand miroir et, par suite, celui du petit nt varier de position. En outre, la distance de la vue distincte t pas la même pour tous les yeux, l'image $a''b''$ doit pouvoir lacée à des distances différentes. Pour tenir compte de ces ions, il est nécessaire d'éloigner ou d'approcher le petit mi- a grand; pour cela, au moyen d'un bouton A (fig. 478), on urner une tringle qui, à l'aide d'un pas de vis, transmet le ment à une pièce B à laquelle est fixé le petit miroir.

'élescope de Newton. — Ce télescope diffère peu de celui de ry; seulement le grand miroir n'est plus percé, et le petit ', qui est plan, est incliné latéralement de 45 degrés vers un re placé sur le côté du corps du télescope. La difficulté de uction que présentent les miroirs de métal avait fait aban- r les télescopes de Gregory et de Newton, lorsque Foucault, parvenu à argenter les miroirs de verre avec une grande tion et sans leur rien faire perdre de leur degré de poli, a à en faire l'application au télescope de Newton. Son premier · n'avait que 10 centimètres de diamètre; mais il en a suc- ement construit de 22 centimètres, de 33, de 42 et de 80. igure 481 ci-après représente un télescope de Newton monté ed parallactique, et la figure 480 en montre une coupe lon- nale. En M est le miroir de verre argenté qui reçoit les rayons tre; et en m est un petit prisme rectangle de verre, sur ténuse duquel les rayons renvoyés par le miroir subissent xion totale (521), et sont rejetés sur le côté de l'instrument. 'interposition de ce prisme, le faisceau A, émis par le bord eur de l'astre, irait converger en a, et le faisceau B, émis

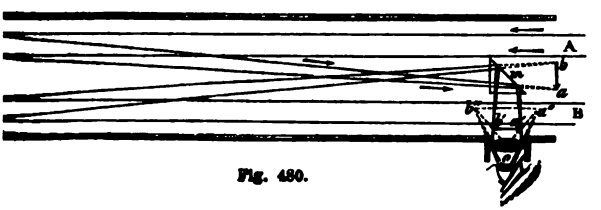


Fig. 480.

bord inférieur, en b. En sorte qu'en ab, au foyer principal oir, il se produirait une image réelle, renversée et très- de l'astre. Mais par suite de la réflexion sur l'hypoténuse me, au lieu de se former en ab, l'image se forme en $a'b'$, ique de ab par rapport au plan m prolongé; là on la regarde a oculaire très-grossissant o, qui donne enfin l'image $a''b''$,

virtuelle et très-amplifiée. Pour simplifier la construction, nous avons supposé l'oculaire à un seul verre; mais celui de Foucault est un oculaire à quatre verres placé sur le côté du télescope, et qui, suivant son pouvoir grossissant et la dimension du miroir argenté, peut donner un grossissement de 50 à 800.

Dans cet instrument, c'est le miroir qui fait l'office d'objectif, mais évidemment sans aucune aberration de réfrangibilité (556). Quant aux aberrations de sphéricité, Foucault est parvenu à les faire disparaître au moyen de retouches successives faites au miroir. Toutefois il a reconnu que, pour corriger les aberrations de sphéricité venant de l'oculaire, il ne devait pas donner à ses miroirs une surface rigoureusement parabolique, mais les terminer par une surface expérimentale qui, agissant de concert avec le système des verres amplificateurs de l'oculaire, assure la perfection de l'image résultante.

Le miroir une fois poli, il reste à l'argenter sur sa surface concave. Pour cela, Foucault a fait usage du procédé Drayton légèrement modifié, en plongeant le miroir dans un bain d'argent d'une nature assez complexe, savoir : eau distillée, alcool pur, nitrate d'argent fondu, nitrate d'ammoniaque, ammoniaque, gomme gutta-banum et essence de girofle. Au contact du verre poli, ce bain se réduit, l'argent se dépose, et, au bout de 20 à 25 minutes, la couche d'argent a acquis l'épaisseur convenable. Quoique la couche ainsi obtenue soit déjà polie et miroitante, on achève de lui donner un poli parfait par un frottement prolongé avec une peau rouge d'oxyde de fer. Ainsi polis, les miroirs argentés réfléchissent 75 pour 100 de la lumière incidente.

Les nouveaux télescopes à miroir parabolique de verre argenté ont, sur les anciens télescopes à miroir sphérique de métal, le triple avantage de donner des images plus pures, d'avoir un poids bien moindre, et d'être beaucoup plus courts, leur distance focale n'étant que six fois le diamètre du miroir.

Ces détails connus, il nous reste à décrire l'appareil dans son ensemble. Le corps du télescope, qui est de bois, a la forme d'un tube octogonal (fig. 481). L'extrémité G est ouverte; à l'autre extrémité est le miroir. A partir de ce dernier, au tiers environ de la longueur, sont fixés deux tourillons reposant sur des coussinets portés par deux montants de bois A et B. Ceux-ci sont eux-mêmes fixés à une table tournante PQ, roulant à l'aide de galets sur un plateau fixe RS, orienté parallèlement à l'équateur. Sur le pourtour de la table tournante est un cercle de cuivre divisé en degrés, et au-dessous, aussi fixé à la table tournante, est un grenage circulaire dans lequel engrène une vis sans fin V. En

ar conséquent à mesurer la *déclinaison* de l'astre, c'est-
sa distance angulaire à l'équateur; tandis que les degrés
autour de la table PQ servent à mesurer l'*ascension droite*,
-dire l'angle que fait le cercle horaire de l'astre avec un
horaire choisi arbitrairement.

r fixer le télescope en déclinaison, une pièce de cuivre E,
montant A, porte une pince dans laquelle glisse le limbe O,
se serre par un bouton à vis *r*. Enfin, sur le côté de l'appa-
l'oculaire *o*, monté sur une plaque de cuivre à coulisse, qui
aussi le petit prisme *m* représenté dans la coupe (fig. 480).

les deux précédents, et l'image est plus éclairée. Quant
sissement, il est, comme dans le précédent, le rapport d
tance focale principale du miroir à celle de l'oculaire.

Fig. 482.

Les télescopes à réfle[illegible] furent adoptés à une époqu
ne savait pas corriger, da[illegible] les objectifs, l'aberration de
bilité; lorsqu'on sut c[illegible]uire des objectifs achromatiq
préféra les télescopes [illegible]riques, c'est-à-dire uniqueme
fraction, comme la lu[illegible]e astronomique, aux télescop
flexion, dont le miroir metallique, pour des dimensions
considérables, présentait de grandes difficultés de const
Aujourd'hui que Foucault a remplacé les miroirs métalli
des miroirs de verre plus faciles à construire, les téle
réflexion peuvent être utilisés comme les télescopes à ré

INSTRUMENTS DE PROJECT

576. Chambre obscure. — La *chambre obscure*, ou *c*

re obscure. Peu de temps après, le même physicien observa dans l'ouverture de la chambre obscure, on fixe une lentille gente, et qu'on place au foyer de celle-ci un écran blanc, qui s'y produit gagne considérablement en éclat, en net- coloris, et est admirable de vérité. Ces images sont d'au- ieux éclairées que la lentille est plus grande, et leurs di- ns augmentent avec la distance focale.

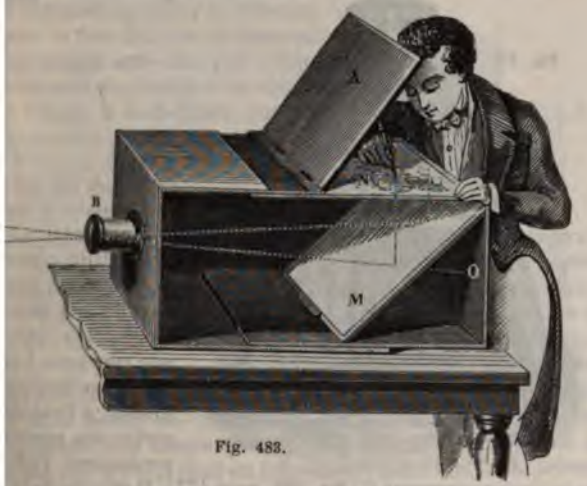


Fig. 483.

utiliser la chambre noire dans l'art du dessin, on lui a liverses formes, de manière à la rendre portative et à re- les images. La figure 483 représente la *chambre noire à* Elle consiste en une boîte rectangulaire, dans laquelle les lumineux R pénètrent au travers d'une lentille B, et tendent former une image sur la paroi opposée O, qui doit être e de la lentille B d'une longueur égale à sa distance focale. rayons, rencontrant un miroir de verre M incliné de 45 changent de direction, et l'image va se former sur un écran e dépoli N. En plaçant sur cet écran une feuille de papier , on peut prendre avec fidélité, au crayon, les contours de Une planchette de bois A sert à intercepter la lumière, irerait l'image et empêcherait de la voir.

tte est formée de deux parties qui peuvent glisser à cou- ne dans l'autre, de manière que la partie antérieure se ti- s ou moins, l'image aille se former, après la réflexion,

Fig. 484. Fig. 485.

cuivre A est u
triangulaire P (
lequel tient lieu
de lentille con
et de miroir; p
une de ses fac
plane, les au
une courbure t
par les réfracti
binées, à l'entr
sortie des rayo
produisent l'e
ménisque convergent C (fig. 420, page 477). Il résulte de l
rayons émis par un objet AB, après avoir pénétré dans l
et éprouvé sur la face *cd* la réflexion totale, vont form
une image réelle de AB.

La tablette B correspond au foyer du prisme contenu d
A : par suite, l'image des objets extérieurs vient se fo
une feuille de papier placée sur cette tablette. Le tout
loppé d'un rideau noir, et, en se plaçant dessous, le des
est complétement dans l'obscurité. La tablette s'enlève

) de 67 degrés et demi. Ce prisme est supporté
age qui permet de le hausser ou de l'abaisser à
; il peut se tourner plus ou moins autour d'un
s arêtes. La face AB étant tournée vers l'objet
'image, les rayons partis de cet objet tombent à
diculaires sur cette
sans réfraction sen-
sprouver la réflexion
BC; car la ligne *ab*
cette face, on recon-
e l'angle d'incidence
sont égaux, comme
perpendiculaires; et
est de 67 degrés et
z est plus grand que
verre (516), condi-

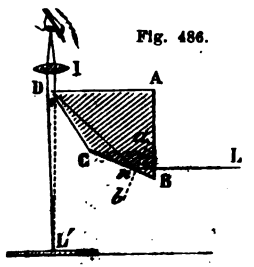


Fig. 486.

que la réflexion totale ait lieu. Arrivés en *o*,
encore la réflexion totale et sortent très-près
vant une direction sensiblement perpendiculaire
sorte que l'œil qui reçoit ces rayons voit en L'
L. Si l'on suit alors les contours de l'image avec
obtient un dessin très-correct. Mais il se pré-
culté assez grande, c'est de voir en même temps
nte du crayon; car les rayons qui viennent de
ne image qui est plus éloignée de l'œil que le
e ce défaut en interposant entre l'œil et le prisme
i donne la même convergence aux rayons venant
ux partis de l'objet; mais encore faut-il placer
bord du prisme et de manière que l'ouverture
ive partagée en deux parties, dont l'une voit
le crayon.

magique. — La *lanterne magique* est un appa-
tenir sur un écran, dans une chambre obscure,
fiées de petits objets. Elle consiste en une boîte
laquelle est une lampe placée au foyer d'un ré-
(fig. 487 et 488). Les rayons réfléchis par celui-
une lentille convergente B, qui les concentre
iverses peintes sur une lame de verre V. Ces fi-
rées fortement, sont placées devant une seconde
te C, à une distance un peu plus grande que sa
incipale. Dans cette position, cette lentille pro-
an convenablement éloigné, une image réelle,
amplifiée, des objets peints sur verre (528, 2°)

Pour redresser l'image, on place le verre peint, dans la lanterne, de manière que les dessins soient renversés.

La lanterne magique a été inventée par le Père Kircher, mort à Rome en 1680.

Le grossissement fourni par la lanterne magique est le même que celui que donnent les lentilles (fig. 432); c'est-à-dire le rap-

Fig. 487.

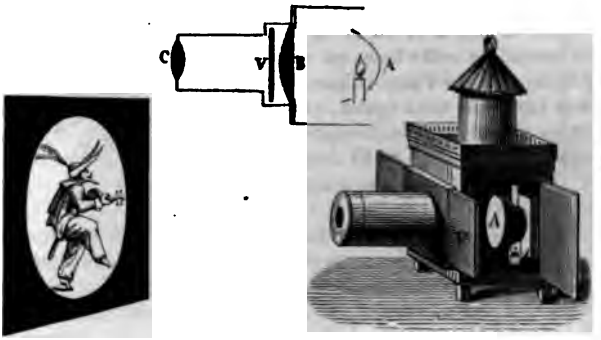


Fig. 488.

port des distances de la lentille C à l'écran et à l'objet. Par conséquent, si l'image est 10 fois, 100 fois plus éloignée de la lentille que l'objet, le grossissement est 10 ou 100. On conçoit dès lors qu'avec une lentille à court foyer on pourra, si l'écran est suffisamment éloigné, obtenir des images très-amplifiées.

579. **Microscope solaire.** — Le *microscope solaire* est une véritable lanterne magique éclairée par les rayons solaires, laquelle sert à obtenir des images très-amplifiées d'objets extrêmement petits. Cet appareil fonctionne dans une chambre noire; la figure 489 le représente fixé au volet de la chambre, et la figure 490 en montre les détails intérieurs.

Un miroir plan M, placé hors de la chambre obscure, reçoit les rayons solaires et les réfléchit vers une lentille convergente *l*, et de là sur une deuxième lentille *o* (fig. 490), nommée *focus*, qui les concentre en son foyer. En ce point est l'objet dont on veut avoir l'image; il est placé entre deux lames de verre, qu'on introduit entre deux lames métalliques *m*, qui les compriment entre elles par l'effet d'un ressort à boudin placé en *n*. L'objet étant alors fortement éclairé et placé très-près du foyer d'un système de trois lentilles très-convergentes *x*, celles-ci en donnent une image *ab*, *renversée* et très-amplifiée, sur un mur ou sur un écran blanc

blement éloigné. Des vis à bouton C et D servent à régler ice des lentilles o et x à l'objet, afin que celui-ci soit exac- au foyer de la première, et que l'image donnée par les x corresponde exactement à l'écran.

ection de la lumière solaire variant constamment, il faut

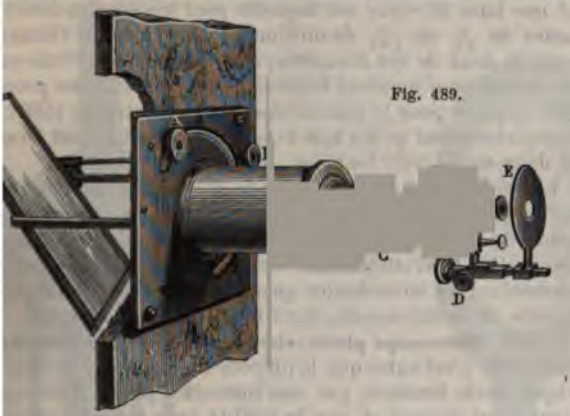


Fig. 489.

e du réflecteur disposé hors du volet de la chambre obscure aussi, afin que la réflexion se fasse constamment suivant microscope. Le procédé le plus précis serait d'avoir re- l'héliostat (510); on y supplée en inclinant plus ou moins

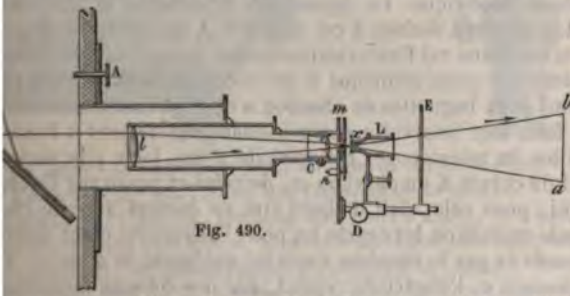


Fig. 490.

M au moyen d'une vis sans fin et d'un pignon B (fig. 489), ant tourner ce même miroir autour de la lentille l, ce ent à l'aide d'un bouton A, qui se meut dans une cou- et transmet au miroir un mouvement de rotation autour le l'instrument.

Le microscope solaire a l'inconvénient de concentrer sur l'objet une chaleur très-intense qui l'altère promptement. On y remédie en interposant une couche d'eau saturée d'alun, qui, ayant un très-faible pouvoir diathermane, arrête une partie de la chaleur (438).

Le grossissement se détermine en mettant à la place de l'objet une lame de verre sur laquelle sont tracées des divisions distantes de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre. Mesurant sur l'image l'intervalle de deux de ces divisions, et le divisant par l'intervalle réel, on obtient pour quotient le grossissement. Le même procédé peut être employé pour le microscope photo-électrique (580). Suivant le grossissement qu'il s'agit d'obtenir, l'objectif x est formé d'une, de deux ou de trois lentilles, toutes achromatiques.

Le microscope solaire donne le moyen de montrer à de nombreux spectateurs des phénomènes curieux : par exemple, la circulation du sang dans la queue des têtards ou dans la langue d'une grenouille ; la cristallisation des sels, et particulièrement du sel ammoniac ; les animalcules qu'on observe dans le vinaigre, dans la colle de farine moisie, dans les eaux stagnantes, etc.

* 580. **Microscope photo-électrique.** — Le *microscope photo-électrique* n'est autre que le précédent éclairé par la lumière électrique. Cette lumière, par son intensité, par la fixité qu'on parvient à lui donner et par la facilité avec laquelle on peut se la procurer à toute heure, est de beaucoup préférable à l'emploi de la lumière solaire. Nous ne décrirons ici que le microscope photo-électrique ; la lumière électrique le sera en parlant de la pile.

Ce sont Foucault et M. Donné qui ont imaginé le microscope photo-électrique. La figure 491 représente la disposition que M. Duboscq a donnée à cet appareil. A une boîte rectangulaire de cuivre jaune est fixé extérieurement un microscope solaire ABD, identique avec celui qui a été décrit ci-dessus. Dans l'intérieur sont deux baguettes de charbon a et c, qui ne se touchent pas tout à fait, leur intervalle correspondant exactement à l'axe des lentilles du microscope. L'électricité d'une forte pile arrive par un fil de cuivre K au charbon a, de celui-ci passe sur le charbon c, qui, pour cela, doit d'abord être en contact avec le charbon a, puis ensuite on les écarte un peu, l'électricité étant suffisamment conduite par le charbon vaporisé qui passe de a sur c. Enfin, du charbon c, l'électricité rejoint, par une colonne métallique o, un second fil de cuivre H qui la ramène à la pile.

Pendant le passage de l'électricité, il se produit entre les charbons un arc lumineux qui répand une lumière du plus éclat et éclaire fortement le microscope. Pour cela, on place dans l'intérieur du tube, une lentille convergente dont le

pal correspond à l'intervalle même des deux charbons. De
te, les rayons lumineux qui entrent dans les tubes D et B
arallèles à leur axe, et tout se passant alors comme dans le
scope solaire ordinaire, il se forme sur un écran E, plus ou
éloigné, une image très-amplifiée de petits objets placés

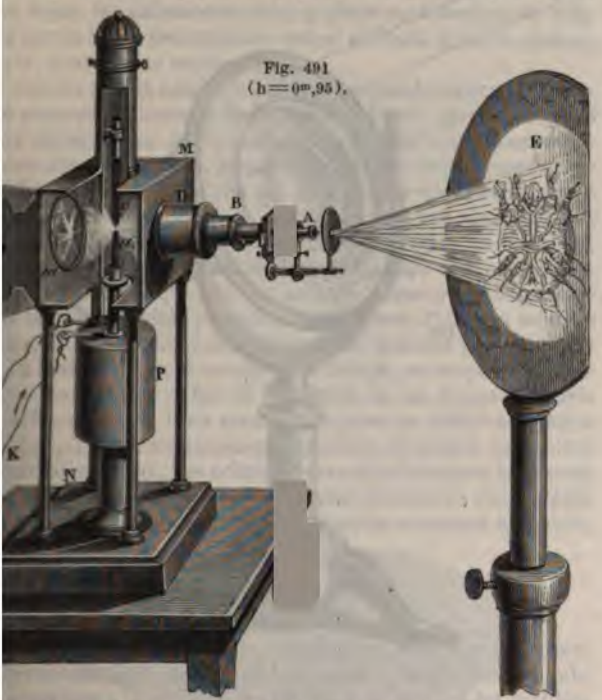


Fig. 491
(h = 0m,95).

leux lames de verre, au bout du tube B. Dans le dessin ci-
, l'objet figuré sur l'écran est l'*acarus* de la gale.
l'appareil ci-dessus, les deux charbons s'usent, et s'usent
ment, *a* plus vite que *c*. Il résulte de là que leur intervalle
augmenter, et que la lumière s'affaiblit et même s'éteint.
tant plus tard de la lumière électrique, on verra comment
nne l'appareil P, qui porte les deux charbons, pour entre-
ur intervalle constant et dans une position fixe.

Lentilles à échelons, phares. — Les lentilles de grandes di-
ns présentent d'extrêmes difficultés de construction; elles

donnent lieu, en outre, à une forte aberration de sphéric dent beaucoup de leur diaphanéité à cause de leur épais pour obvier à ces inconvénients qu'on a construit les *échelons*. Ces lentilles, imaginées par Buffon et perfecti

Fig. 492.

Fresnel, sont formées, au centre, d'une lentille plan (fig. 492 et 493), entourée d'une suite de segments a concentriques A, B, dont chacun a une face plane situ côté que la face plane de la lentille centrale, tandis q opposées ont une courbure telle, que les foyers des di ments viennent se former au même point. L'ensembl neaux forme donc, avec la lentille centrale, une lent représentée en coupe dans la figure 493. Le dessin a près une lentille de 60 centimètres de diamètre envir segments annulaires sont formés d'une seule pièce de

ns les lentilles plus grandes chaque segment est lui-même mé de plusieurs secteurs.

Derrière la lentille est un support fixé par trois tringles, sur quel se posent les corps qu'on veut soumettre à l'action des ons solaires qui tombent sur la lentille. Le support correspon- nt au foyer, les substances qu'on y place sont fondues et vola- isées par la haute température qui se produit. L'or, le platine, quartz, sont fondus rapidement.

Autrefois on faisait usage de réflecteurs paraboliques pour por- r à de grandes distances la lumière des *phares*. On nomme ainsi s feux qu'on allume sur les côtes, pendant la nuit, pour servir guides aux navigateurs. Aujourd'hui on fait uniquement usage lentilles à échelons. Le *feu* est produit par une forte lampe à ou 5 mèches concentriques, ou par la lumière électrique. Il placé au foyer principal d'une lentille à échelons, en sorte que faisceau émergent est parallèle (fig. 422, page 478), et ne per- t de son intensité que par son passage à travers l'atmosphère), il peut être visible jusqu'à 60 kilomètres. Pour que tous les de l'horizon soient successivement éclairés par un même , la lentille se meut autour de la lampe, au moyen d'un mé- isme d'horlogerie, et fait sa révolution en un temps qui varie phare à un autre. Il en résulte que pour les différents points horizon, il y a successivement apparition et éclipse de lumière s intervalles égaux. Les éclipses servent à distinguer les phares feu accidentel; de plus, c'est d'après le nombre des éclipses s produisent dans un temps donné qu'on reconnaît un phare, r suite la côte qui est en vue.

PHOTOGRAPHIE

. Daguerréotype. — Le *daguerréotype*, ainsi appelé du nom inventeur, est un appareil qui sert à fixer, sur des sub- s *sensibles* à la lumière, les images que forment les lentilles ngentes dans la chambre obscure (576). L'art d'obtenir ainsi ages des objets par l'action de la lumière a reçu le nom de *graphie*. On distingue la *photographie sur plaque métal- sur papier* et *sur verre*.

1770, le célèbre chimiste suédois Scheele avait reconnu que ure d'argent, qui se conserve blanc dans l'obscurité, noir- l'action de la lumière. A l'aide de cette propriété du chlo- rgent on pouvait déjà reproduire des gravures; car si, sur ille de papier recouverte de cette substance, on applique avure et qu'on expose le tout à la lumière solaire de ma-

nière que celle-ci soit interceptée par les parties noires de la gravure, le papier chloruré n'est noirci que dans les parties qui correspondent aux clairs, et les autres restent blanches. Dans la copie ainsi obtenue, les teintes sont renversées, c'est-à-dire que les noires sont devenues les claires, et réciproquement. Cette copie a en outre le défaut de ne pouvoir être conservée que dans l'obscurité; car, exposée à la lumière, elle noircit dans toutes ses parties, et disparaît.

Il restait à produire les images sans inversion de clairs et d'ombres, et à les fixer, c'est-à-dire à les rendre, une fois formées, insensibles à l'action de la lumière. Charles, en France, Wedgwood et Davy, en Angleterre, s'occupèrent de la solution de ce problème, qui a été résolu par Niepce et Daguerre. Le premier, après des recherches patientes continuées de 1814 à 1829, était parvenu à former, sur une lame de cuivre plaquée d'argent, une image inaltérable à la lumière, dans laquelle les teintes claires ou sombres occupaient la même place que dans l'objet. Mais dans le procédé de Niepce, où la substance impressionnable était le bitume de Judée, plongé ensuite dans un mélange d'huile de lavande et de pétrole, l'action de la lumière devait se prolonger pendant 10 à 12 heures, ce qui était tout à fait impraticable pour le portrait.

En 1829, Niepce communiqua ses procédés à Daguerre, déjà connu par l'invention du *diorama*, et qui lui-même s'occupait depuis plusieurs années, des mêmes recherches; mais ce ne fut qu'après un travail de dix ans que Daguerre fit connaître, en 1839, la belle découverte qui eut un si grand retentissement en France et à l'étranger. Niepce, mort depuis six ans, ne put recueillir la part de gloire qui lui revenait si bien.

Le procédé de Daguerre se compose de cinq opérations principales : 1° le polissage de la plaque mince de cuivre doublé d'argent, sur laquelle doit se former l'image; 2° le dépôt sur cette plaque de la *couche sensible*, c'est-à-dire de la substance qui la rend impressionnable à la lumière; 3° l'exposition de la plaque dans la chambre noire, à l'action de la lumière; 4° l'exposition de cette même plaque aux vapeurs mercurielles qui font apparaître l'image; 5° la fixation de l'image.

La plaque une fois polie au rouge d'Angleterre et au tripoli, on l'expose à de la vapeur d'iode jusqu'à ce qu'elle ait pris une teinte jaune d'or. Elle est alors apte à recevoir l'action de la lumière, mais seulement pour prendre des vues ou des copies. Elle ne pourrait encore être employée pour le portrait, parce qu'elle exige une action de la lumière de 8 à 10 minutes pour être impressionnée. Il reste donc à la soumettre à l'action de substances accélérantes

es, c'est-à-dire qui exaltent la sensibilité de la couche d'io-
e, et permettent à l'image de se produire seulement en quel-
s secondes. Ces substances sont une dissolution aqueuse de
ne, ou du bromure de chaux solide. La plaque est exposée à
apeur de l'une de ces substances pendant 30 à 60 secondes.
omme elle est alors très-impressionnable à la lumière, on la
'erme dans un châssis de bois où elle est recouverte, du côté

Fig. 494
(h = 28)

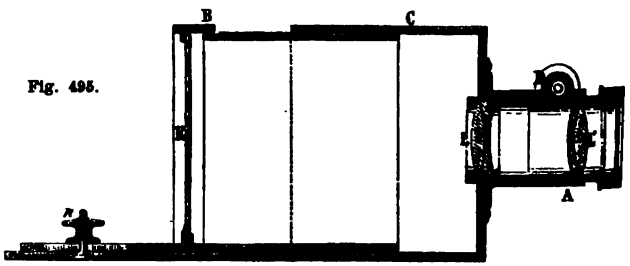
enté, par un écran à coulisse. Dans cet état, elle est portée
s une petite chambre noire portative, représentée en perspec-
dans la figure 494, et en coupe, sur une échelle plus grande,
s la figure 495.

ette pièce, qu'on désigne sous le nom de *daguerréotype*, est
véritable chambre noire à tirage (576), composée d'une partie
C, et d'une partie mobile B, qui peut entrer plus ou moins
s la première. Dans un tube de laiton A est l'*objectif*, c'est-à-
l'appareil qui sert à concentrer la lumière sur la plaque et à
oduire l'image. Il consista d'abord en une seule lentille bi-
vexe achromatique; mais on ne tarda pas à adopter des objec-
à deux lentilles achromatiques L, L' (fig. 495), qu'on désigne
le nom d'*objectifs à verres combinés*. Ils opèrent plus vite
les objectifs à un seul verre, ont une distance focale moindre,
ermettent de mettre très-facilement au foyer. Pour cela, la
ille L étant fixe, la seconde lentille L' peut s'en approcher ou
écarter plus ou moins à l'aide d'une crémaillère et d'un pi-
D, qui font marcher le tube dans lequel est cette lentille. La
i opposée à l'objectif est formée d'un écran de verre dépoli
dans un cadre E, qui s'enlève à volonté. S'agit-il d'obtenir un
rait, on fait asseoir le modèle à 3 ou 4 mètres en avant de l'ob-
f, puis on tire la caisse mobile B, jusqu'à ce que l'image

se produit renversée sur la plaque de verre, apparaisse avec netteté, ce qui a lieu lorsque la plaque est sensiblement au foyer. On achève ensuite de mettre au foyer, en approchant ou en écartant l'objectif au moyen du bouton D. Pour les portraits, on met au foyer par rapport aux yeux de la personne qui pose, cette partie du visage étant la plus centrale.

Le foyer trouvé, on enlève le cadre E et l'écran de verre, et

Fig. 495.



l'on met à la place le châssis qui contient la plaque iodée; retirant enfin l'écran à coulisse qui masque la face argentée, l'image qui se formait sur le verre se forme actuellement sur la plaque. C'est alors que la lumière produit son action et dessine sur la plaque une image invisible. Le temps pendant lequel doit se prolonger l'exposition de la plaque à la lumière varie avec l'objectif, avec la préparation de la couche sensible et avec l'intensité de la lumière, il peut aller de 8 à 50 secondes.

Lorsqu'il est temps d'arrêter l'action de la lumière, ce qu'on ne reconnaît qu'avec une grande habitude, on abaisse l'écran à coulisse, et on retire le châssis dans lequel la plaque se trouve dans une complète obscurité, ce qui est aussi indispensable qu'avant son introduction dans la chambre noire. Si l'on regardait la plaque en ce moment, on n'apercevrait encore aucune trace d'image; pour rendre celle-ci visible, on expose la plaque à l'action des vapeurs de mercure à 75 degrés environ. Ces vapeurs se déposent, en gouttelettes imperceptibles, sur les parties qui ont été fortement éclairées; et, au bout de quelques minutes, il se forme un amalgame d'argent et de mercure qui donne les blancs de l'épreuve, tandis que les autres parties restent noires par l'effet même du bruni de la plaque. L'image est alors visible, et peut rester exposée à la lumière. Toutefois la plaque est encore recouverte d'une couche d'iodure d'argent, qui donne à l'épreuve une teinte rougeâtre. On fait disparaître cette teinte en lavant la plaque dans une dissolution d'hyposulfite de soude.

reuve ainsi obtenue ne résistant pas à la plus légère fric-
reste à fixer l'image. Pour cela, on lave la plaque dans une
n faible de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude. Dans cette
on, de l'argent se dissout, tandis que l'or se combine avec
ure et l'argent de la plaque; l'amalgame de mercure et d'ar-
ui forme les blancs de l'épreuve augmente alors de solidité
lat en se combinant avec l'or, d'où résulte un remarquable
sement d'intensité dans les clairs de l'image. C'est à M. Fi-
a'est dû l'emploi du chlorure d'or, qui est le principal per-
nement qu'on ait apporté à la découverte de Daguerre.
recédé de Daguerre est abandonné aujourd'hui et remplacé
photographie sur verre et sur papier.

Photographie sur plaques de verre collodionnées. — La pho-
tie sur verre et celle sur papier comprennent deux opéra-
istinctes. Dans la première, on obtient une image dont les
sont renversées, c'est-à-dire que les parties claires sont
es les noires, et réciproquement; c'est l'*image négative*.
a seconde opération, on se sert de la première image pour
ner une seconde dont les teintes sont renversées de nou-
t se retrouvent, par conséquent, dans leur ordre naturel;
image positive.

uves négatives sur verre. — On nettoie une plaque de
n la frottant avec un tampon de linge trempé d'abord dans
vre pourrie délayée dans de l'alcool, puis avec de l'alcool
t on la frotte ensuite avec une peau de daim. De la propreté
laque dépend en grande partie la réussite de l'épreuve.
laque bien nettoyée, on la pose horizontalement, et l'on
n son milieu du collodion liquide contenant une dissolu-
iodure de potassium; puis on incline la plaque dans diffé-
ens, de manière à obtenir une couche de collodion bien
me dans toute son étendue, et on l'incline enfin vers l'un
angles afin de laisser écouler l'excès de liquide.
er du collodion se vaporisant, celui-ci prend un aspect
à ce moment, on plonge la plaque dans une dissolution con-
1 gramme d'azotate d'argent pour 10 grammes d'eau; là
e de potassium se transforme en iodure d'argent. Cette
ion doit être faite dans une pièce obscure, éclairée seule-
ar une bougie, ou par une lampe recouverte d'un verre
ugé, ou d'un cylindre de papier de même couleur. On
plaque environ une minute dans le bain d'argent, puis
goutter; quand elle est bien sèche, on la place dans un
mé, et on la porte dans la chambre noire de Daguerre
, de la même manière qu'on l'a déjà vu pour les

Les parties ombrées de l'image qui n'ont pas reçu l'
lumière restent blanches, l'iodure d'argent n'ayant
composé. Mais comme ce sel noircirait promptement
de la lumière, et ferait ainsi disparaître l'image, on la
dans une dissolution d'hyposulfite de soude, qui diss
d'argent; ce qui rend l'image inaltérable par la lum

Épreuves positives sur papier.— L'épreuve négati
obtenue, sert à produire un nombre indéfini d'image
Pour cela, on la recouvre d'un papier imprégné de ch
gent, et ayant comprimé l'épreuve et le papier entre
de verre, on expose le tout à l'action de la lumière,
que les parties noires de l'image négative portent o
papier au chlorure d'argent. Il se reproduit alors sur
copie de l'image négative, où les parties claires sont
par les ombres, et réciproquement; on a donc ainsi
positive. Il reste à la fixer, ce qu'on obtient en lavan
comme ci-dessus, dans une dissolution d'hyposulfit
Enfin, pour donner du ton à l'épreuve, ce qu'on appe
on la plonge quelques heures dans un bain de chlorur
tenant un gramme de chlorure pour un litre d'eau.

584. **Épreuves positives sur verre.**— On obtient de b
ves positives sur verre en préparant d'abord les plaq
pour les épreuves négatives (583); mais l'exposition à
dans la chambre obscure, doit être moins prolongée q
plaques négatives, moitié environ. On les plonge e
une dissolution saturée de protosulfate de fer. L'i

plaques de verre préparées au collodion présentent cet inconvénient, qu'elles doivent être employées aussitôt leur préparation, tandis que celles préparées à l'albumine peuvent attendre huit jours et plus avant d'être soumises à l'action de la lumière ; mais elles doivent subir cette action pendant beaucoup plus longtemps que les plaques préparées au collodion. Aussi sont-elles sans usage pour le portrait, et seulement employées à prendre des vues.

C'est à Niepce de Saint-Victor qu'est dû le procédé de photographie par l'albumine. Pour préparer cette substance, on bat en neige un certain nombre de blancs d'œufs, on laisse reposer, on décante, puis on ajoute 1 pour 100 d'iodure de potassium et 25 pour 100 d'eau. On a ainsi un liquide qu'on peut conserver plusieurs jours dans un flacon bien bouché.

La plaque de verre sur laquelle on veut étendre l'albumine doit être parfaitement décapée de la même manière que pour le collodion (583). Enfin, on chauffe la plaque légèrement pour y faire adhérer, du côté opposé à celui qui doit servir, un bout de tube de gutta-percha, qui sert de manche pour manier la plaque.

Tenant la plaque par son manche, on verse dessus une couche de liquide albumineux, préparé comme il a été dit ci-dessus ; puis, tenant le manche de gutta-percha entre les deux mains, on le fait tourner rapidement, ainsi que la plaque, ce qui imprime au liquide un mouvement centrifuge qui fait accumuler sur les bords de la plaque l'excès d'albumine, qu'on enlève avec une pipette.

La plaque, une fois albuminée et séchée, est placée pendant une minute dans un bain d'argent contenant 8 d'azotate d'argent et 8 d'acide acétique cristallisable pour 100 d'eau. Retirée du bain, elle peut être placée dans la chambre noire à l'état humide ; lorsqu'on veut s'en servir à l'état sec, il faut la débarrasser de l'excès d'argent qu'elle contient en la lavant dans de l'eau distillée, puis la faire sécher dans l'obscurité, et alors on peut la conserver plusieurs jours avant de s'en servir.

Quand la plaque ainsi préparée a subi l'action de la lumière dans la chambre noire, pendant 20 minutes environ, on fait apparaître l'image en plongeant la plaque dans une dissolution d'acide gallique qu'on chauffe doucement à la lampe. Quelques gouttes de dissolution d'azotate d'argent ajoutées au bain d'acide gallique hâtent notablement l'apparition de l'image et donnent plus de vigueur. Enfin, ayant lavé la plaque à grande eau, on fixe l'image par une immersion pendant 5 minutes dans un bain d'hyposulfite de soude, contenant 8 d'hyposulfite pour 100 d'eau.

L'image ainsi obtenue est négative, et sert ensuite à donner des épreuves positives sur verre albuminé ou sur papier.

CHAPITRE VI

VISION

586. Structure de l'œil humain. — *L'œil* est l'organe de la *vision*, dire du phénomène en vertu duquel la lumière émise ou réfléchie par le fait naître en nous la sensation qui nous décèle leur présence.

Situé dans une cavité osseuse qu'on nomme *orbite*, l'œil est maintenu muscles qui servent à le mouvoir, par le nerf optique, la conjonctive, le pières et l'aponévrose orbito-oculaire. Tous ces moyens, en lui assurant u tention solide, lui permettent des mouvements très-variés et très-étend

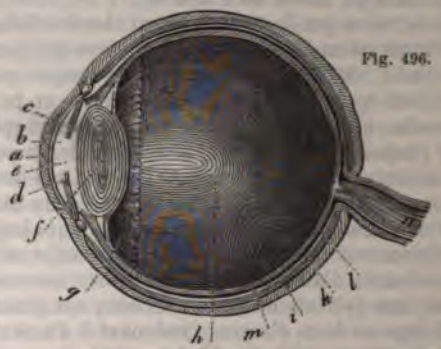


Fig. 496.

volume est à peu près le même chez tous les individus, l'ouverture varia paupières le fait seul paraître plus ou moins volumineux.

La figure 496 montre une coupe transversale de l'œil d'avant en arri voit que sa forme générale est celle d'un sphéroïde dont la courbure, à la antérieure, est plus grande qu'à la partie postérieure. L'œil est composé d branes et de milieux, qui sont : la *cornée*, la *sclérotique*, l'*iris*, la *pupille meur aqueuse*, le *cristallin*, le *corps vitré*, la *membrane hyaloïde*, la ch la *rétine*, le *nerf optique*.

Cornée. — La cornée *a* est une membrane transparente située en av globe de l'œil. Elle a sensiblement la forme d'une petite calotte sphériqu une base de 11 à 12 millimètres de diamètre. Sa circonférence, taillée en aux dépens de sa face externe, s'enchâsse dans la sclérotique *i*, et l'adh de ces deux membranes est telle, qu'elles ont été considérées par quelqu tomistes comme une seule et même membrane.

Sclérotique. — La sclérotique *i* est une membrane qui, avec la cornée loppe toutes les parties constituantes de l'œil. Elle présente en avant u verture à peu près circulaire, dans laquelle est enchâssée la cornée; à la postérieure et interne, elle est perforée pour donner passage au nerf op

Iris. — L'iris *d* est un diaphragme annulaire, opaque, adhérent par rimètre extérieur, et libre par son bord central. Cette membrane est plac la cornée et le cristallin. C'est elle qui forme la partie colorée de l'œil;

[redacted]

le, non pas à son centre, mais un peu en dedans, d'une ouverture qu'on ne *pupille*, et qui, chez l'homme, est circulaire. Chez quelques animaux, elle troite et allongée dans le sens vertical, particulièrement chez ceux du genre , et dans le sens transversal chez les ruminants. C'est par la pupille que les ns lumineux pénètrent dans l'œil. Son diamètre, variable pour un même idu, est en moyenne de 3 à 7 millimètres; mais ces limites peuvent être ssées. Les alternatives d'agrandissement et de resserrement de la pupille rent rapidement; elles sont fréquentes et jouent un rôle important dans le omène de la vision. La pupille se contracte sous l'influence d'une vive lu- e; elle se dilate, au contraire, dans l'obscurité. Les mouvements de l'iris ssent être involontaires.

après ce qui précède, l'iris est un écran à ouverture variable, dont la fonc- est de régler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil, puisque la gran- de la pupille varie en sens contraire de l'intensité de la lumière. L'iris sert re à corriger l'aberration de sphéricité, en empêchant les rayons marginaux raverser les bords du cristallin; c'est-à-dire qu'il remplit à l'égard de l'œil le d'un diaphragme dans les instruments d'optique (539).

umeur aqueuse. — Entre la partie postérieure de la cornée et la partie an- ure du cristallin est un liquide transparent qu'on appelle *humeur aqueuse.* pace *e*, occupé par cette humeur, est partagé en deux compartiments par ; la partie *b*, comprise entre la cornée et l'iris, se nomme *chambre anté- re;* la partie *c*, qui est entre l'iris et le cristallin, est la *chambre postérieure.*

ristallin. — Le cristallin est un corps lenticulaire *f*, placé derrière l'iris et près de cette membrane. Remarquable par sa transparence, le cristallin est loppé dans une membrane diaphane comme lui, qu'on nomme sa *capsule*, et adhère par son bord à la couronne annulaire formée par les *procès ciliaires g.* nce antérieure a une convexité moindre que la face postérieure. Son tissu composé d'une suite de lamelles à peu près concentriques, plus dures au re qu'à la circonférence. Les couches les plus superficielles ont une mollesse , qu'elles sont presque à l'état liquide. On leur a donné le nom d'*humeur forgagni.* Leur pouvoir réfringent décroît du centre à la périphérie.

orps vitré, membrane hyaloïde. — On appelle *corps vitré*, ou *humeur vitrée*, masse transparente, comparable à l'albumine de l'œuf, qui occupe toute la le à du globe de l'œil située en arrière du cristallin. Le corps vitré est en- ppé par la *membrane hyaloïde l*, qui tapisse la face postérieure de la capsule alline et toute la face interne d'une autre membrane qu'on nomme *rétine.*

étine, nerf optique. — La rétine *m* est une membrane destinée à recevoir pression de la lumière et à la transmettre au cerveau par l'intermédiaire nerf *n*, nommé le *nerf optique*, qui part du cerveau, pénètre dans l'œil, épanouit sur la rétine, sous la forme d'un réseau.

a rétine et le nerf optique ne jouissent que de la propriété spéciale de recevoir le transmettre au cerveau l'impression des images; ils sont tout à fait insen- s-à l'action des corps vulnérants. Ces organes ont été coupés, piqués, sans les animaux soumis à ces expériences aient manifesté la moindre douleur.

horoïde. — La choroïde *k* est une membrane interposée entre la rétine et la ptique. Elle est essentiellement vasculaire et recouverte, sur sa face interne ipalement, d'une matière noire semblable au pigment de la peau des nègres, stinée à absorber les rayons qui ne doivent pas coopérer à la vision.

a choroïde se prolonge en avant en formant une suite de replis saillants *g*, a nomme *procès ciliaires*, et qui s'engagent entre l'iris et la capsule cris- ne, à laquelle ils adhèrent, en formant autour d'elle un disque assez compa- à celui d'une fleur radiée. Par son tissu vasculaire, la choroïde sert à trans- r le sang dans l'intérieur de l'œil, et surtout aux procès ciliaires.

V. Indices de réfraction des milieux transparents de l'œil. ·

de réfraction des parties transparentes de l'œil ont été déte

Brewster. Ils sont réunis dans le tableau suivant, avec celui de l'eau comme terme de comparaison.

Eau.	1,3358	Enveloppe extérieure du cristallin.	1,3767
Humeur aqueuse.	1,3366	Centre du cristallin	1,3900
Humeur vitrée.	1,3394	Réfraction moyenne du cristallin.	1,3639

588. **Marche des rayons dans l'œil.** — D'après les diverses parties qui composent l'œil, on peut comparer cet organe à une chambre obscure (576) dont la

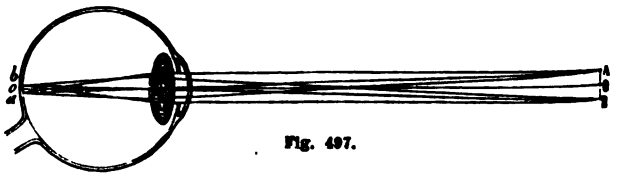


Fig. 497.

pupille est l'ouverture, le cristallin la lentille convergente, et la rétine l'écran sur lequel va se peindre l'image. L'effet est donc le même que celui par lequel se forme, au foyer conjugué d'une lentille biconvexe, l'image d'un objet placé en avant de la lentille. Soit, en effet, un objet AB (fig. 497), placé en avant de l'œil, et considérons les rayons émis d'un point quelconque A de cet objet vers l'œil. A leur entrée dans l'humeur aqueuse, ils éprouvent une première réfraction qui les rapproche de l'axe A*a*, tiré par le centre optique du cristallin; puis ils rencontrent celui-ci, qui les réfracte de nouveau comme une lentille biconvexe; et enfin, après avoir subi une dernière réfraction dans l'humeur vitrée, ils vont concourir en un point *a* et y former l'image du point A. Les rayons partis du point B allant de même former en *b* l'image de ce point, il en résulte une image *ab* très-petite, réelle et renversée, qui se forme exactement sur la rétine quand l'œil est bien conformé.

589. **Renversement des images.** — Pour s'assurer que les images formées sur la rétine sont bien réellement renversées, on prend un œil d'albinos, parce que la choroïde des yeux de ces animaux est privée de pigment, et que, par conséquent, la lumière peut la traverser complétement; puis on dépouille cet œil, à la partie postérieure, du tissu cellulaire qui l'enveloppe. Ainsi préparé, on le fixe à une ouverture pratiquée au volet d'une chambre obscure, et l'on observe alors, à l'aide d'une loupe, que les images renversées des objets extérieurs viennent se peindre sur la rétine.

Le renversement des images dans l'œil a beaucoup occupé les physiciens et les physiologistes, et de nombreuses théories ont été proposées pour expliquer comment il se fait que nous ne voyions pas les objets renversés. Les uns ont admis que c'est par l'habitude et par une véritable éducation de l'œil que nous voyons les objets redressés, c'est-à-dire dans leur position relative par rapport à nous. D'autres pensent que nous rapportons le lieu réel des objets dans la direction des rayons lumineux qu'ils émettent, et que, ces rayons se croisant dans le cristallin (fig. 497), l'œil voit les points A et B respectivement dans les directions *a*A et *b*B; par suite l'objet paraît droit. Telle était l'opinion de Dalembert. Müller, Volkmann et autres soutiennent que, comme nous voyons tout renversé, et non pas uniquement un objet parmi d'autres, rien ne peut paraître renversé, puisque nous manquons alors de termes de comparaison. Il faut avouer qu'aucune de ces théories n'est bien satisfaisante.

590. **Axe optique, angle optique, angle visuel.** — On nomme axe optique *principal* d'un œil son axe de figure, c'est-à-dire la droite par rapport à laquelle il est symétrique. Dans un œil bien conformé, c'est la droite qui passe

par le centre de la pupille et par le centre du cristallin ; telle est la droite Oo (fig. 497). Les lignes Aa, Bb, sont des axes secondaires. C'est dans la direction de l'axe optique principal que l'œil voit le plus nettement les objets.

L'*angle optique* est l'angle BAC (fig. 498) formé par les axes optiques principaux

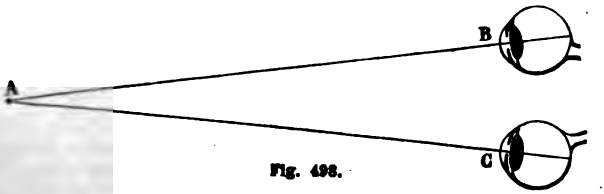


Fig. 498.

des deux yeux, lorsqu'ils sont dirigés vers un même point. Cet angle est d'autant plus petit, que les objets sont plus éloignés.

L'*angle visuel* est l'angle AOB (fig. 499) sous lequel est vu un objet, c'est-à-dire l'angle formé par les axes secondaires menés du centre optique du cristallin aux extrémités opposées de l'objet. Pour une même distance, cet angle croît avec la grandeur de l'objet, et, pour un même objet, il décroît quand la distance

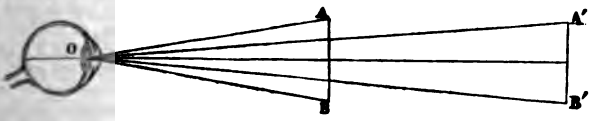


Fig. 499.

augmente, comme il arrive si l'objet passe de AB en A'B'. Il résulte de là que les objets paraissent d'autant plus petits, qu'ils sont plus éloignés, car les axes secondaires AO, BO se croisant au centre du cristallin, la grandeur de l'image projetée sur la rétine dépend de la grandeur de l'angle visuel AOB.

491. **Appréciation de la distance et de la grandeur des objets.** — L'appréciation de la distance et de la grandeur dépend du concours de plusieurs circonstances, qui sont : l'angle visuel, l'angle optique, la comparaison avec des objets dont la grandeur nous est familière, la diminution de netteté de l'image par l'interposition d'un air plus ou moins vaporeux.

Lorsque la grandeur d'un objet est connue, comme la taille d'un homme, la hauteur d'un arbre ou d'une maison, on en apprécie la distance par l'ouverture de l'angle visuel sous lequel on le voit. Si la grandeur de l'objet est inconnue, on la juge relativement à celle des objets qui l'entourent.

Une colonnade, une avenue d'arbres, nous paraissent diminuer de grandeur à mesure que leur distance augmente, parce que l'angle visuel décroît ; mais l'habitude de voir des colonnes, des arbres, avec la hauteur qui leur convient, fait que notre jugement rectifie l'apparence produite par la vision. De même, quoique des montagnes fort éloignées soient vues sous un fort petit angle et n'occupent [illegible] faible espace dans le champ de la vision, habitués aux effets de perspective aérienne, nous leur restituons leur grandeur réelle.

[illegible] angle optique est aussi un élément essentiel pour apprécier la distance ; cet angle augmentant ou diminuant quand les objets s'approchent ou s'éloignent, le mouvement que nous imprimons à nos yeux pour que leurs axes optiques concourent vers l'objet que nous regardons, nous donne l'idée de son éloignement. Mais ce n'est que par une longue habitude que nous arrivons à établir ainsi la relation entre la distance qui nous sépare des objets et le mouvement [illegible]

respondant de nos yeux. On remarque, en effet, que les aveugles de naissance auxquels on rend la vue par l'opération de la cataracte jugent d'abord tous les objets à la même distance.

592. Distance de la vue distincte. — On appelle *distance de la vue distincte* la distance à laquelle les objets doivent être placés pour être vus avec plus de netteté. Cette distance varie avec les individus, et souvent, pour le même individu, d'un œil à l'autre. Pour de petits objets, comme des caractères d'imprimerie, elle est, à l'état normal de l'œil, de 25 à 30 centimètres. Les personnes qui ne voient qu'à une distance plus courte sont *myopes*, et celles qui ne voient qu'à une distance plus grande sont *presbytes* (603).

593. Adaptation de l'œil à toutes les distances. — L'œil présente une propriété remarquable qui ne se rencontre au même degré dans aucun instrument d'optique : c'est que, quoique les images tendent à se former d'autant plus en avant de la rétine que les objets sont plus éloignés (528, 2°), elles viennent se former toujours sur cette membrane; car l'œil voit nettement à des distances très-variables, à partir de celle qui correspond à la vue distincte. Toutefois, si nous pouvons voir nettement à des distances très-inégales, nous ne le pouvons pas simultanément, ce qui indique quelques modifications dans le système de l'œil, ou du moins la nécessité de fixer notre attention sur l'objet que nous voulons voir. En effet, si l'on vise deux objets alignés, situés, par exemple, l'un à un mètre, l'autre à deux mètres de l'œil, en regardant le premier objet, le second paraît nébuleux, tandis que, si l'on regarde le second, c'est le premier à son tour qui devient nébuleux. Donc, quand l'œil est disposé pour voir à une distance, il ne l'est pas pour voir à une autre, mais il peut successivement s'adapter à l'une et à l'autre.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer comment l'œil peut voir nettement à des distances très-différentes. Pouillet et Mile en trouvent la cause dans les dilatations et les contractions de la pupille. Suivant le dernier, les rayons lumineux éprouvent, sur les bords de l'iris, une diffraction ou inflexion qui peut donner lieu à des distances focales très-différentes. Se fondant sur l'inégale réfrangibilité du cristallin, laquelle décroît du centre à la circonférence, et observant qu'il doit en résulter une suite de foyers dont les plus rapprochés sont formés par les rayons qui traversent le cristallin plus près de son centre, Pouillet admet que la pupille s'ouvrant plus ou moins, les objets éloignés sont vus par les bords du cristallin, et les plus rapprochés par le centre. On remarque, en effet, que les contractions et les dilatations du trou pupillaire sont liées à l'accommodation de l'œil aux distances; mais il importe d'observer qu'elles le sont aussi aux variations d'intensité de la lumière, et que, pour une même distance, l'ouverture de la pupille peut varier beaucoup.

Rohaut, Olbers et autres ont émis l'opinion que le diamètre de l'œil, d'avant en arrière, varie sous l'influence de la pression des muscles qui font mouvoir cet organe, de manière à rapprocher ou à écarter la rétine du cristallin, en même temps que l'image s'en approche ou s'en écarte elle-même.

Hunter et Young ont attribué au cristallin une propriété contractile en vertu de laquelle il prend une forme plus ou moins convexe, de manière à faire toujours converger les rayons sur la rétine.

Képler, Camper et beaucoup d'autres ont admis que, par l'action des procès ciliaires, le cristallin peut se déplacer et se rapprocher plus ou moins de la rétine.

Enfin, on a admis que la netteté de la vision à des distances très-diverses peut provenir, non pas de ce que la rétine ou le cristallin se déplace de manière que l'image vienne toujours se former sur la rétine, mais de ce que les variations qu'éprouve la distance focale du cristallin, à mesure que les objets s'éloignent, sont assez petites pour que l'image conserve une netteté suffisante.

Cette dernière théorie est confirmée par les expériences de Magendie et par celles de de Haldat. Le premier a observé, sur un œil d'albinos, que la netteté *des images* ne variait pas pour des objets placés à des distances fort inégales;

de Haldat a trouvé que si l'on place un cristallin comme objectif au volet d'une chambre obscure, on obtient sur un verre dépoli des images également nettes des objets extérieurs, que ceux-ci soient à la distance de 3 à 4 décimètres, ou de 20 à 30 mètres. Cette propriété du cristallin à l'état d'inertie semble contraire aux lois de la réfraction; elle doit être attribuée à la structure de cet organe, qu'elle distingue tout à fait des lentilles ordinaires. De Haldat n'a point donné l'explication de ces phénomènes.

594. Vue simple avec les deux yeux. — Lorsque les deux yeux se fixent sur un même objet, il se forme sur chaque rétine une image, et cependant nous ne voyons qu'un objet. Pour expliquer la vue simple avec les deux yeux, Gassendi admettait qu'à un même instant la perception n'a lieu que pour l'une ou l'autre image, ce qui ne peut être admis d'après les expériences de M. Wheatstone, que nous rapportons plus loin (596).

Taylor et Wollaston ont émis l'opinion que deux points homologues de droite ou de gauche, sur les deux rétines, correspondent à un même filet nerveux cérébral de droite ou de gauche, bifurqué à l'entrecroisement des deux nerfs optiques. Cette opinion est d'accord avec un fait qu'on observe chez quelques individus, c'est la paralysie transitoire de la rétine, par moitié et du même côté pour chaque œil, de droite ou de gauche simultanément, en sorte que les malades ne voient que la moitié droite ou la moitié gauche des objets. Wollaston et Arago ont observé sur eux-mêmes cette affection de la rétine.

Brewster attribue l'unité de sensation à l'habitude que nous acquérons de rapporter à un même objet les impressions simultanées sur les deux rétines.

Voici les principaux faits qui s'observent dans la vision avec les deux yeux.

On voit plus clair avec deux yeux qu'avec un; regardant un objet d'abord avec un seul œil, puis avec les deux, la différence d'éclat est sensible.

Lorsque les deux yeux sont fixés chacun sur un objet différent, de manière que les deux axes optiques concourent au delà ou en deçà de ces objets, il peut se produire des illusions d'optique remarquables. Par exemple, si l'on regarde deux

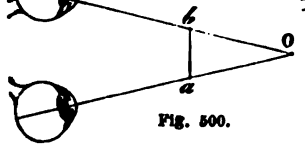


Fig. 500.

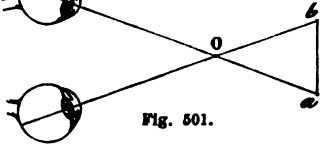


Fig. 501.

objets identiques et de petites dimensions *a* et *b*, au moyen de deux tubes isolants qui donnent aux axes optiques des deux yeux les directions concourantes aO et bO (fig. 500), on ne voit qu'un objet unique, mais plus éloigné, au point de rencontre O des deux axes.

Si le point de croisement des deux axes est en avant des points qu'on regarde (fig. 501), on ne voit encore qu'un seul objet, mais plus près, au point O.

Si les objets *a* et *b* sont deux petits disques, l'un rouge et l'autre vert, on voit un disque blanc, le vert et le rouge étant deux couleurs complémentaires (545). Ces diverses expériences démontrent que les impressions dans les deux yeux sont simultanées et se superposent pour donner une sensation unique.

595. Cause du relief apparent des corps. — On doit à M. Wheatstone des expériences qui montrent une différence essentielle entre la vision avec les deux yeux et la vision avec un seul. Il résulte de ces expériences que ce n'est qu'avec les deux yeux qu'on peut avoir une perception nette du relief des corps, c'est-à-dire de leurs trois dimensions. Il est même probable qu'avec un seul œil le

relief ne nous paraît appréciable que parce que les objets que nous regardons nous sont généralement connus. En effet, dans la vision avec les deux yeux, quand l'objet est à une faible distance, les deux axes devant converger vers l'objet, il en résulte que la perspective change pour chaque œil et que les deux images sont sensiblement inégales. C'est ce qu'il est facile de constater en regardant alternativement un même objet avec chaque œil. Par exemple, supposons qu'on regarde à vol d'oiseau une petite pyramide régulière C, à base hexagonale (fig. 502), en se plaçant de manière que la verticale menée par son sommet passe exactement entre les deux yeux. Ceux-ci étant ouverts tous les deux

Fig. 502. Fig. 503. Fig. 504.

on la voit telle qu'elle est représentée dans la figure 502. Mais si, conservant la même position, on ferme l'œil gauche, l'œil droit voit alors seul la pyramide, les faces latérales de gauche plus en raccourci que celles de droite (fig. 504). Au contraire, si l'on ferme l'œil droit, le gauche aperçoit la figure 503; c'est-à-dire que ce sont les faces latérales de droite qui sont maintenant vues plus en raccourci. Il est donc démontré que les images perçues par les deux yeux ne sont pas identiques; il reste à constater par l'expérience que c'est bien de la perception simultanée de ces deux images que résulte le relief apparent des corps.

596. **Stéréoscope.** — En s'appuyant sur les considérations qui précèdent, Wheatstone imagina, en 1838, un appareil à l'aide duquel on voit en relief, sur une surface plane, les images d'objets à trois dimensions. De là le nom de *stéréoscope* donné à cet appareil, de deux mots grecs qui signifient *voir solide*.

Le principe du stéréoscope consiste à placer devant chaque œil une image différente d'un même objet, l'une avec la perspective correspondant à l'œil droit, et l'autre avec celle qui correspond à l'œil gauche, lorsqu'ils regardent cet objet à une petite distance. Si l'on dispose alors l'appareil de manière que, l'œil droit ne voyant que l'image qui lui est destinée, et l'œil gauche l'autre, les deux images se superposent, il est évident qu'il doit se former sur chaque rétine exactement la même image que si l'on regardait l'objet même. En effet, on obtient ainsi une perception tellement vive et distincte du relief, que l'illusion est complète et vraiment surprenante.

Dans le stéréoscope construit par M. Wheatstone, c'était par la réflexion sur deux miroirs plans qu'on obtenait la superposition des deux images. Mais dans le stéréoscope modifié par Brewster, la superposition des deux images se produit à l'aide de deux lentilles convergentes. La figure 505 montre quelle est la marche des rayons dans l'appareil. En A est le dessin que doit regarder l'œil gauche, et en B celui destiné à l'œil droit. Au-dessus sont deux lentilles m et n, qui sont respectivement les oculaires des deux yeux. Or les rayons partis de deux points homologues des images se réfractent à leur passage dans ces lentilles, et prennent les mêmes directions que s'ils étaient partis d'un point unique C. C'est donc là que se superposent les images virtuelles des dessins A et B, et qu'apparaît l'objet avec un relief d'une fidélité parfaite. Par exemple, si l'on place en B et en A les deux figures 502 et 504, on apercevra en C une image unique et en relief de la pyramide, telle qu'elle est représentée dans la figure 503.

[redacted]

nsable que les deux lentilles *m* et *n* impriment rigoureusement
ion aux rayons, et pour cela elles doivent être identiques. Brew-
e résultat en coupant en deux une lentille biconvexe, et en pla-
droite devant l'œil gauche, puis la
devant l'œil droit, comme le repré-
505.

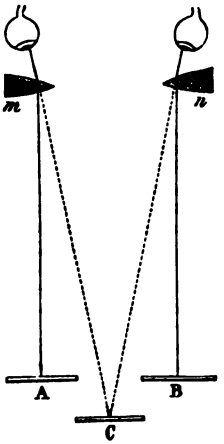


Fig. 505.

stéréoscope, Foucault et le docteur
nstaté que, lorsque les deux rétines
ndes simultanément par deux cou-
s, il y a perception d'une couleur
l'aptitude à la recomposition des
une teinte unique varie d'une ma-
ne individu à un autre, et peut
t faible, même nulle chez quel-
n éclairant avec deux faisceaux
lémentaires (545) deux disques
fond du stéréoscope, et en regar-
ne coloré avec un œil, on voit un
ique, ce qui montre que la sensa-
ière blanche peut naître de deux
rematiques complémentaires et si-
chacune des deux rétines.

insensible de la rétine. — La
s également sensible dans toutes ses
que le prouve l'expérience suivante
: on marque deux points noirs sur
, à quelques centimètres de distance
; puis, le papier étant très-rapproché de l'œil, on fixe le point de
œil droit, ce qui n'empêche pas de voir l'autre point; mais si
tement le papier, le point de droite disparaît à une certaine dis-
paraître bientôt si l'on continue à éloigner le papier. La même
l'on regarde le point de droite avec l'œil gauche.

emarqué qu'au moment où le point cesse d'être visible, son image
l'insertion même du nerf optique. On a donné le nom de *pun-*
ce point insensible à l'action de la lumière.

ance de l'impression sur la rétine. — Lorsqu'on fait tourner
charbon incandescent, on aperçoit comme un ruban de feu con-
, la pluie qui tombe sous forme de grosses gouttes apparaît dans
e suite de filets liquides. Ces différentes apparences sont dues à
sion des images sur la rétine persiste encore après que l'objet qui
disparu ou s'est déplacé. La durée de cette persistance varie avec
e la rétine et l'intensité de la lumière. Plateau, à Bruxelles, a
est, en moyenne, d'une demi-seconde.

des couleurs persiste aussi bien que celle de la forme des objets;
t tourner des cercles divisés en secteurs peints de diverses cou-
les-ci se confondent et donnent la sensation de la couleur qui ré-
ir mélange. Le bleu et le jaune donnent le vert; le jaune et le
; le bleu et le rouge, le violet; les sept couleurs du spectre, le blanc,
ntre le disque de Newton (343, 5°).

sieurs appareils curieux dont les effets s'expliquent par la persis-
ation sur la rétine. Tels sont le *thaumatrope*, le *phénakisticope*,
uday, le *kaléidophone*.

accidentelles. — Un objet coloré étant placé sur un fond noir,
fixement pendant un certain temps, la vue est bientôt fatiguée,
e la couleur s'affaiblit; dirigeant alors les yeux sur un carton

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénome
accidentelles. Darwin a admis :

1° Que la partie de la rétine fatiguée par une couleur est dev
aux rayons de cette couleur, et n'est plus impressionnée que par s
plémentaire ;

2° Que cette partie de la rétine prend *spontanément* un mode d
qui produit la sensation de la couleur complémentaire.

La première partie de cette théorie n'explique pas le fait ci-dess
leurs accidentelles apparaissent même dans l'obscurité ; et la secon
que l'énoncé même du phénomène des images accidentelles.

600. **Irradiation.** — L'*irradiation* est un phénomène par lequel
ou d'une couleur très-vive, vus sur un fond obscur, paraissent a
sions plus grandes que celles qui leur sont propres. L'inverse a lie
noir vu sur un fond blanc. On admet que l'irradiation provient
pression sur la rétine se propage au delà du contour de l'image.

L'effet de l'irradiation est très-sensible sur la grandeur appare
qui peuvent ainsi paraître plusieurs fois plus grands qu'ils ne so

D'après les recherches de Plateau, l'irradiation varie considér
personne à une autre, et même d'un jour à l'autre pour une mêm
savant a constaté, en outre, que l'irradiation croît avec l'éclat de
rée de la contemplation. Enfin, elle se manifeste à toutes les dis
tilles divergentes l'augmentent, celles qui sont convergentes la d

601. **Auréoles accidentelles, contraste des couleurs.** — On n
accidentelles des couleurs qui, au lieu de succéder à l'impression d'u
les couleurs accidentelles, apparaissent autour de l'objet lui-mêm
regarde fixement. L'impression de l'auréole est opposée à celle d
à-dire que, si celui-ci se détache en clair, l'auréole est obscure ;
si l'objet est obscur.

Le *contraste des couleurs* est une réaction réciproque entre deu
sines, en vertu de laquelle chacune d'elles s'ajoute à la couleur c
de l'autre. Ce contraste a été observé par M. Chevreul, qui en a
approfondie et en a donné la loi. C'est par l'influence réciproque d
cidentelles que s'explique le contraste des couleurs.

M. Chevreul a trouvé que les couleurs rouge et orangé étant

a observé que, dans une lunette à deux verres, un fil très-fin, placé
l'instrument, au foyer de l'objectif, est vu distinctement au tra-
ire, lorsque la lunette est éclairée uniquement avec de la lumière
e le fil cesse d'être visible si l'on éclaire la lunette avec de la lu-
l'oculaire étant resté dans la même position. Or on remarque que,
fil, il faut diminuer la distance des lentilles beaucoup plus que ne
gré de réfrangibilité de la lumière violette dans le verre. Il faut
que, dans cette expérience, il y a un effet dû à l'aberration de ré-
l'œil.
on côté, en contemplant avec un seul œil un disque blanc placé
oir, a trouvé que l'image est pure quand l'œil est accommodé à la
que, c'est-à-dire que l'image vient se faire sur la rétine; mais il a
l'œil n'est pas accommodé à cette distance, c'est-à-dire si l'image
it eu en arrière de la rétine, le disque paraît entouré d'une bande
ête.
ut de ces expériences que l'œil est achromatique tant que l'image
distance focale, ou tant qu'il s'accommode à la distance de l'objet.
s dire jusqu'ici quelle est précisément la cause de cet achroma-
t de l'œil; mais on l'attribue généralement à la ténuité des fais-
ux qui passent par l'ouverture pupillaire, et à ce que les rayons
frangibles, rencontrant les surfaces des milieux de l'œil sous des
que normales, sont très-peu réfractés, d'où il résulte que l'aber-
ngibilité est insensible (556).
erration de sphéricité, on a déjà vu comment elle est corrigée par
éritable diaphragme arrêtant les rayons marginaux qui tendent à
istallin, et ne laissant passer que les plus rapprochés de l'axe.
, presbytisme. — Les affections les plus communes de l'organe
la myopie et le presbytisme. La *myopie* est une accommodation
yeux pour une distance moindre que celle de la vue distincte or-
te que les personnes qui en sont affectées ne voient nettement que
rapprochés. La cause de la myopie est une trop grande convexité
u du cristallin; l'œil étant alors trop convergent, le foyer, au lieu
sur la rétine, se forme en avant, ce qui fait que l'image est con-
fuse à ce défaut de l'œil au moyen de verres divergents, qui, en
ayons de l'axe commun, reculent le foyer et le portent sur la

ation habituelle de petits objets, les observations microscopiques,
naître la myopie. Ce vice de conformation est commun chez les
l diminue avec l'âge.
me est le contraire de la myopie. Dans cette affection, l'œil voit
bjets éloignés, mais ne distingue pas nettement les objets rappro-
ytisme est dû à ce que l'œil n'étant pas assez convergent, l'image des
hés va se former au delà de la rétine; mais si les objets s'éloignent,
proche de la rétine (528), et lorsqu'ils sont à une distance conve-

p' par d. On fait ici usage de la formule [6] du paragraphe 538, et
formule [5], parce que l'image qu'on voit dans les besicles étant
que l'objet par rapport à la lentille, le signe de p' doit être contrai
ainsi que cela a lieu pour les images virtuelles, d'après le paragra

Pour les myopes, on calcule f par la formule $\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{f}$, q
aux lentilles divergentes (538), et donne $f=\frac{pd}{p-d}$ [2], en rempla

Soit proposé, par exemple, de calculer le numéro des verres qu
un presbyte pour lequel la distance de la vue distincte est 35 po
que la distance de la vue distincte ordinaire est de 11 pouces. En f
et $d=35$, dans la formule [1] ci-dessus, on trouve $f=\frac{35\times 11}{35-11}=$

Quant à la mesure de la distance de la vue distincte, on l'obti
assez grande précision au moyen d'un petit appareil qu'on nomme

605. **Diplopie.** — La *diplopie* est une affection de l'œil qui fait
objets doubles, c'est-à-dire qu'on en voit deux au lieu d'un. En géné
images se superposent presque entièrement, et l'une d'elles est beau
parente que l'autre. La diplopie peut résulter du concours de de
gaux; mais elle peut aussi affecter un seul œil. Ce dernier cas est
à quelque défaut de conformation dans le cristallin ou dans d'aut
l'œil, qui fait que le faisceau lumineux se bifurque et va former sur l
images au lieu d'une. Un seul œil peut être même affecté de *triplopie*
ce cas, la troisième image est excessivement faible.

606. **Achromatopsie.** — On nomme *achromatopsie* une affection
nous rend incapables de juger des couleurs, où du moins de certai
Chez quelques personnes, en effet, l'insensibilité est complète, tandis
apprécient quelques couleurs. Les personnes atteintes de cette aff
guent très-bien les contours des corps, les parties claires ou dans l
elles n'en distinguent pas les teintes.

On désigne aussi l'achromatopsie sous le nom de *daltonisme*, parce
qui l'a décrite avec soin, en était affecté.

re, et l'on met à côté de lui une lampe dont le pied porte un écran E, destiné arrêter la lumière du côté de la tête du sujet et à la maintenir dans l'obscurité. L'observateur, tenant alors d'une main le réflecteur M, le dirige de manière à centrer vers l'œil B du sujet la lumière envoyée par la lampe, tandis que, de

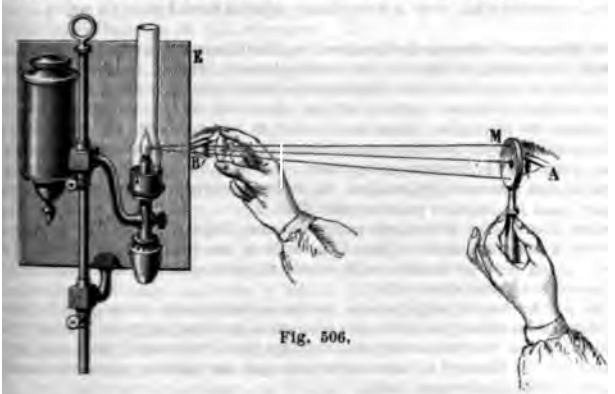


Fig. 506.

utre main, il maintient devant l'œil la lentille *o*. Par cette disposition, le fond l'œil se trouvant fortement éclairé, on en distingue très-bien les lésions.

La figure 507 fait voir comment se produit l'image que perçoit l'observateur regardant à travers le trou central du réflecteur : *ab* étant la partie éclairée la rétine, soit d'abord le cas où la lentille *o* n'est pas maintenue devant l'œil B : rayons qui éclairent le fond de l'œil étant renvoyés vers le cristallin *c*, le tra- rsent en se réfractant comme dans une lentille et vont former en $a'b'$ une image rienne, réelle et renversée de la partie *ab* du fond de l'œil. C'est cette image e l'observateur voit par le trou du miroir; mais elle est confuse. Au contraire, l'on interpose la lentille *o*, les rayons se réfractent de nouveau en la traver- ai, l'image va se former en $a''b''$, plus petite et plus nette, mais toujours réelle

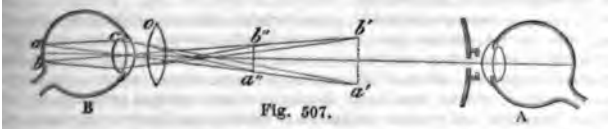


Fig. 507.

renversée. Avec une lentille divergente, l'image serait virtuelle et redressée ; r, dans ce cas, la lentille biconcave et le cristallin *c* forment un système ana- ue à la lunette de Galilée (574).

La grande quantité de lumière que l'ophthalmoscope concentre sur l'œil peut, s beaucoup de cas, l'irriter d'une manière fâcheuse. Il importe alors d'inter- er entre la lampe et le réflecteur des verres colorés, qui absorbent les rayons quels sont surtout les rayons rouges, les rayons jaunes et les rayons Follin et Jansen ont reconnu que les meilleurs verres sont ceux lé- erés en vert, ou teintés en bleu par le cobalt.

s de détails sur les ophthalmoscopes et leur application, nous ren- lecteur à l'ouvrage du Dr Follin : *Leçons sur l'exploration de l'œil*.

* CHAPITRE VII

SOURCES DE LUMIÈRE, PHOSPHORESCENCE

608. Diverses sources de lumière. — Les diverses sources de lumière sont le soleil, les étoiles, la chaleur, les combinaisons chimiques, la phosphorescence, l'électricité et les phénomènes météoriques. Nous ne traiterons de ces deux dernières sources de lumière qu'aux articles *Électricité* et *Météorologie*.

L'origine de la lumière émise par le soleil et par les étoiles est inconnue; on admet seulement que la substance enflammée dont paraît entouré le soleil est gazeuse, parce que la lumière de cet astre, de même que celle qui est émise par les substances gazeuses enflammées, ne laisse apercevoir aucune trace de polarisation dans les lunettes polariscopes (628).

Quant à la lumière développée par la chaleur, d'après Pouillet, les corps commencent à devenir lumineux dans l'obscurité à une température de 500 à 600 degrés, et au delà la lumière qu'ils émettent est d'autant plus vive, que leur température est plus élevée (547).

C'est par les hautes températures qui les accompagnent qu'un grand nombre de combinaisons chimiques donnent naissance à un dégagement de lumière. Telle est la cause des lumières artificielles utilisées pour l'éclairage; car, ainsi qu'on l'a déjà vu, les flammes ne sont autre chose que des matières gazeuses chauffées au point d'être lumineuses (450).

Les corps devenant lumineux à une température élevée, la chaleur semble alors se transformer en lumière, ce qui tend à prouver que ces deux agents doivent être rapportés à une seule et même cause, surtout si l'on observe qu'en général les rayons lumineux sont accompagnés de rayons calorifiques. Toutefois l'identité n'est pas complète, car on connaît plusieurs substances qui peuvent luire dans l'obscurité sans dégager de chaleur, ou, si elles en dégagent, ce n'est qu'en quantité inappréciable aux instruments thermométriques les plus sensibles. Cette propriété va être étudiée sous le nom de *phosphorescence*.

609. Phosphorescence, ses sources. — La *phosphorescence* est la propriété que possèdent un grand nombre de substances d'émettre de la lumière à des températures inférieures à 500 degrés, lorsqu'on les place dans certaines conditions.

M. Ed. Becquerel, qui a fait une étude approfondie de la phosphorescence, rapporte ce phénomène à cinq causes :

1° La *phosphorescence spontanée*, dans certains végétaux et dans certains animaux; elle est très-intense chez le fulgore (porte-lanterne) et chez le lampyre (ver luisant), et l'éclat de leur lumière varie sous l'empire de leur volonté. Dans les régions tropicales, la mer est souvent couverte d'une lumière phosphorescente assez vive, qui est due à des zoophytes d'une extrême petitesse. Ces animalcules répandent une matière lumineuse si subtile, que Quoy et Gaymard, pendant un voyage sous l'équateur, en ayant placé deux dans un bocal rempli d'eau, le liquide devint immédiatement lumineux dans toute sa masse.

2° La *phosphorescence par élévation de température*, qui se manifeste surtout dans certains diamants et dans les variétés de spath fluor, qui, chauffé à 300 ou 400 degrés, devient tout à coup lumineux et répand une lueur bleuâtre assez vive.

3° La *phosphorescence par effets mécaniques*, tels que le frottement, la percussion, le clivage, etc. Par exemple, lorsque, dans l'obscurité, on frotte deux cristaux de quartz l'un contre l'autre, ou qu'on casse un morceau de sucre.

4° La *phosphorescence par l'électricité*, comme celle qui résulte du frottement du mercure contre le verre dans l'intérieur du tube barométrique, et surtout des étincelles électriques provenant, soit d'une machine électrique ordinaire, soit d'une batterie, soit d'une bobine de Ruhmkorff.

phosphorescence par insolation, c'est-à-dire par la lumière solaire ou la
diffuse de l'atmosphère. Un grand nombre de substances, après avoir été
osées à la lumière, brillent dans l'obscurité d'une vive lueur, dont la
l'intensité dépendent de la nature et de l'état physique de ces substances.
genre de phosphorescence que nous allons surtout faire connaître en ré-
es travaux de M. Ed. Becquerel.

'hosphorescence par insolation. — Ce genre de phosphorescence a
été observé, en 1604, dans le *phosphore de Bologne* (sulfure de barium);
Ed. Becquerel a retrouvé cette propriété dans un grand nombre d'autres
s. Celles qui la présentent au plus haut degré sont les sulfures de cal-
barium et de strontium. Quand elles sont bien préparées, ces substances,
solation, peuvent luire pendant plusieurs heures dans l'obscurité. Or
ar se produisant dans le vide comme dans les gaz, on ne peut l'attri-
ne action chimique, mais plutôt à une modification temporaire qui
issance sous l'influence de la lumière.

les sulfures cités ci-dessus se placent, quant au degré de phosphorescence,
nombre de diamants (surtout les jaunes) et la plupart des échantillons
fluor; puis l'aragonite, les calcaires concrétionnés, la craie, la chaux
ée, arséniatée, sulfatée; le nitrate de chaux et le chlorure de calcium
; le cyanure de calcium; un grand nombre de sels à base de strontiane
cyte; la magnésie et son carbonate, etc. Un grand nombre de substances
s acquièrent aussi la phosphorescence par insolation; par exemple, le
e, la soie, le sucre de canne, le sucre de lait, le succin.

Becquerel a reconnu que chaque substance est inégalement impres-
ar les différents rayons du spectre. Le maximum a lieu dans les rayons
même un peu au delà, et en général la teinte émise par les corps phos-
ts correspond à des rayons d'une moindre réfrangibilité que ceux de la
ctive.

nte que prennent les corps phosphorescents est très-variable et change,
même composé, avec le mode de préparation. Dans les composés de stron-
sont les teintes vertes et bleues qui dominent; dans les sulfures de ba-
sont les teintes orangées, jaunes et vertes.

rée de la phosphorescence est très-variable d'un corps à un autre; elle
e la sensibilité des matières et de la température, et est généralement
moindre, que la température est plus élevée. Avec les sulfures de cal-
e strontium, la phosphorescence se prolonge, à la température ordinaire,
0 heures; avec d'autres substances, elle n'est que de quelques minutes,
ues secondes, et même que d'une fraction de seconde.

hosphoroscope. — Lorsqu'on expérimente sur des corps dont la phos-
nce se prolonge quelques minutes, ou même quelques secondes, il suffit
poser à la lumière solaire ou à la lumière diffuse pendant quelques in-
uts de les rentrer dans l'obscurité; leur lueur est alors très-apparente,
l'on a pris soin de tenir les yeux fermés pendant quelques instants.
r les corps dont la phosphorescence ne dure que pendant un intervalle
très-court, ce procédé est insuffisant. Dans ce cas, M. Ed. Becquerel a
un ingénieux appareil, auquel il a donné le nom de *phosphoroscope*, et
et d'observer le corps aussitôt après l'action de la lumière, l'intervalle
re l'insolation de l'observation pouvant être rendu aussi petit qu'on le
mesuré avec une grande précision.

pareil se compose d'une caisse cylindrique AB (fig. 508), de tôle noircie,
de toutes parts, sauf les deux fonds de la caisse, dans lesquels sont
s deux ouvertures opposées, ayant la forme d'un secteur circulaire. Une
ses ouvertures *o* est visible dans le dessin. La caisse est fixe; mais elle
sée à son centre par un axe mobile auquel sont fixés deux
et F', de tôle noire (fig. 509). Chacun de ces écrans est per

ouvertures de même forme que celles pratiquées sur les deux fonds de la caisse; mais, tandis que ces dernières ouvertures se correspondent, celles des écrans alternent, de manière que les parties pleines de l'un correspondent toujours aux parties ouvertes de l'autre. Enfin, les deux écrans sont renfermés dans la caisse,

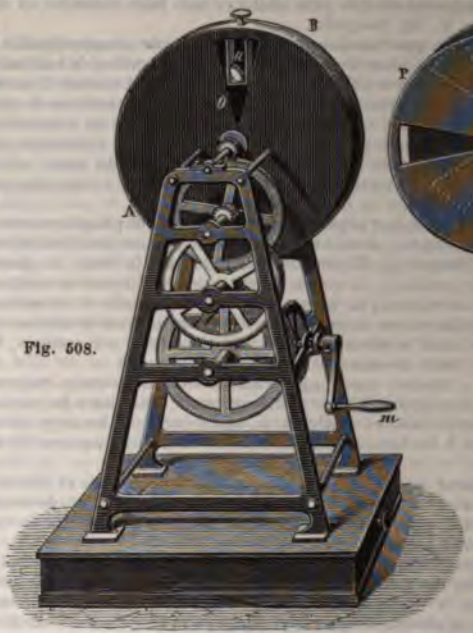


Fig. 508.

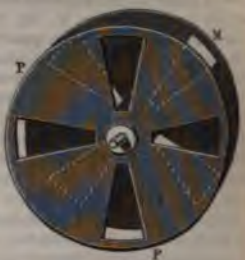


Fig. 509.

et sur leur axe est un petit pignon extérieur à celle-ci, qui reçoit le mouvement d'une manivelle *m* par une série de grandes roues agissant sur des pignons, de manière à multiplier la vitesse.

Pour étudier, avec le phosphoroscope, la phosphorescence d'une substance quelconque, on en place un fragment *a* sur un étrier fixe, interposé entre les deux écrans tournants. Il résulte de la disposition de ces écrans, que la lumière ne peut jamais passer en même temps par les ouvertures opposées des parois A et B de la caisse, parce qu'il y a toujours entre elles un des pleins de l'écran M ou de l'écran P. Par suite, quand la lumière qui vient de l'autre côté de l'appareil tombe sur le corps *a*, celui-ci ne sera pas visible pour l'observateur qui regardera l'ouverture *o*, car alors il sera masqué par un des pleins de l'écran P. Réciproquement, toutes les fois que le même observateur verra le corps *a*, celui-ci ne sera plus éclairé, la lumière étant interceptée par les pleins de l'écran M. Il y aura donc alternativement apparition et éclipse du corps *a* : éclipse pendant le temps qu'il est éclairé, et apparition pendant le temps qu'il cesse de l'être. Quant au temps qui s'écoule entre l'éclipse et l'apparition, il dépend de la vitesse de rotation des écrans. Supposons qu'ils fassent 150 tours par seconde; une révolution des écrans se faisant en $\frac{1}{150}$ de seconde, il y aura dans le même temps quatre

et quatre éclipses. Par conséquent, l'intervalle qui séparera l'instant
re agit de l'instant où l'on observe le corps sera $\frac{1}{8}$ de $\frac{1}{150}$ de seconde,
0,0008 de seconde.
périmenter avec le phosphoroscope, on se renferme dans une chambre
ant placé derrière l'appareil, du côté des engrenages, on fait arriver
côté, sur la substance *a*, un faisceau de lumière solaire ou de lumière
Imprimant alors aux écrans une rotation plus ou moins rapide, le
paraît lumineux par transparence d'une manière continue, aussitôt que
entre l'insolation et l'observation est moindre que la durée de la
cence du corps. En expérimentant ainsi, M. Ed. Becquerel a trouvé que
e corps qui ne deviennent pas lumineux par le procédé ordinaire, le
alors dans le phosphoroscope : tel est le spath d'Islande. Les substances
ent le plus vif éclat dans cet appareil sont les composés d'uranium,
nent à répandre une lueur très-vive quand l'observateur peut les
ou 0,004 de seconde après l'insolation. Mais un grand nombre de sub-
présentent aucun effet dans le phosphoroscope : tels sont le quartz,
le phosphore, les métaux et les liquides.
orescence. — On nomme *fluorescence* une sorte de phosphorescence
, s'épuisant très-vite. Elle s'observe avec les solutions de sulfate de
esculine, de chlorophylle, avec les verres d'urane, et avec certains
s de spath fluor. Lorsque ces substances sont exposées dans les rayons
u violet du spectre, même dans les rayons invisibles, elles prennent
nent une teinte violacée assez vive; ce qui indique que les rayons
au delà du spectre, sont transformés en rayons moins réfrangibles.
nènes ont surtout été étudiés par M. Stokes (549). Le caractère dis-
re la phosphorescence et la fluorescence est que la première persiste
mps après que le faisceau lumineux qui l'a excitée est éteint, tandis
rescence cesse instantanément avec lui.

---

* CHAPITRE VIII

OUBLE RÉFRACTION, INTERFÉRENCE, POLARISATION

ble réfraction. — On a déjà vu (512) que la *double réfraction* est la
ue possèdent un grand nombre de cristaux de donner naissance, pour
ron incident, à deux rayons réfractés; d'où il résulte que lorsqu'on re-
bjet au travers de ces cristaux, on le voit double. La double réfraction
té observée par Bartholin, en 1647; mais c'est Huyghens qui, le pre-
673, en donna une théorie complète.
taux qui possèdent la double réfraction sont dits *biréfringents*. Cette
'observe, à des degrés inégaux, dans tous les cristaux qui n'appartien-
au système cubique. Les corps cristallisés dans ce système, et ceux qui
s de cristallisation, comme le verre, ne possèdent pas la double réfrac-
peuvent l'acquérir accidentellement, quand on les comprime inégale-
par la *trempe*, c'est-à-dire par le refroidissement brusque après avoir
n. Les liquides et les gaz ne sont jamais biréfringents. De toutes les
, celle qui présente le phénomène de la double réfraction d'une manière
ente, est le spath d'Islande.
a expliqné la double réfraction par une inégale densité de l'éther dans
x biréfringents, d'où résulte une vitesse du mouvement vibratoire plus
s une certaine direction qui est déterminée par l'état moléculaire du
te hypothèse se trouve confirmée par la propriété qu'a
biréfringent par la trempe et par la compression (641)

Fig. 510.

le plus fréquent en optique d'Islande, le quartz et la t spath a la forme d'un rho les faces sont inclinées de 105° 5′ (fig. 510). Les faces, au nomb des rhombes qui se réunissent, trois par trois, par leurs angles trémités d'une droite *ab* qui est l'*axe de cristallisation*.

Brewster a constaté cette loi générale, dans les cristaux à un *de double réfraction coïncide toujours avec l'axe de cristallisation*.

On nomme *section principale* d'un cristal à un axe le plan qu l'axe optique, est perpendiculaire à une face soit naturelle, soit cristal.

615. **Rayon ordinaire et rayon extraordinaire.** — Des deux r auxquels donnent naissance les cristaux à un axe, l'un suit toujours l fraction simple (513); mais l'autre n'est pas soumis à ces lois; c'e rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle n'est pas constant, et que le plan de réfraction ne coïncide pas av cidence. Le premier de ces rayons est dit le *rayon ordinaire*, et l' *extraordinaire*. Les images qui leur correspondent se désignent ell les noms d'*image ordinaire* et d'*image extraordinaire*.

Le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire ont des indices d certains cristaux, c'est l'indice du rayon ordinaire qui est le plus d'autres, c'est l'indice du rayon extraordinaire. Fresnel a nommé *cristaux négatifs*, et les derniers, *cristaux positifs*. Le spath d'Isl maline, le saphir, le rubis, l'émeraude, le mica, le prussiate de po phate de chaux, sont négatifs; le quartz, le zircon, la glace, l'ap seul axe, sont positifs. La classe des cristaux négatifs est beauco breuse que celle des cristaux positifs.

La figure 511 montre la marche des rayons dans le phénomène réfraction, le parallélogramme *abcd* représentant une coupe principale d'un rhomboèdre de spath d'Islande. Celui-ci étant posé sur un carton blanc, on regarde au travers un point noir *o* tracé sur le carton. Le rayon incident au point *o* se divise

ible réfraction, dans les cristaux à un axe, est soumis aux lois

rdinaire, quel que soit son plan d'incidence, suit toujours les *les de la réfraction simple* (518).

section perpendiculaire à l'axe, le rayon extraordinaire suit *ois comme le rayon ordinaire, mais son indice de réfraction* *e que celui de ce dernier rayon;* de là la distinction en *indice* *indices extraordinaire.*

ction principale, le rayon extraordinaire ne suit que la seconde *lon, c'est-à-dire que les plans d'incidence et de réfraction coïn-* *s le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction* *t.*

s la lumière dans un cristal n'étant pas la même pour le rayon *ur le rayon extraordinaire, la différence des carrés de ces deux* *rtionnelle au carré du sinus de l'angle que le rayon extraordi-* *'axe.*

l, le premier, a donné une théorie complète de la double réfrac- le système des ondulations, a fait connaître une construction -remarquable, à l'aide de laquelle on peut, dans toutes ses po- rt à l'axe, construire le rayon réfracté, quand on connaît son a théorie de Huyghens fut rejetée par les physiciens jusqu'à ce ; établi l'exactitude par de nombreuses expériences.

a double réfraction dans les cristaux à deux axes. — Les axes sont très-nombreux : de ce genre sont les sulfates de ale, de baryte, de potasse, de fer, le sucre, le mica, la topaze es différents cristaux, l'angle des deux axes prend des valeurs ar il varie depuis 3 jusqu'à 90 degrés.

avert par la théorie et démontré par l'expérience que, dans les axes, ni l'un ni l'autre des rayons réfractés ne suivent les lois de de; mais en appelant *ligne moyenne* et *ligne supplémentaire* les t l'angle des deux axes et son supplément en deux parties égales, *dans toute section perpendiculaire à la ligne moyenne, un des* *uit les lois ordinaires de la réfraction, et que, dans toute section* *s la ligne supplémentaire, c'est l'autre rayon qui suit ces lois.*

ôt, dans les appareils de polarisation, de nombreuses applica- de réfraction du spath d'Islande. Cette propriété a été aussi unette micrométrique de Rochon, appareil qui sert à mesurer rent des corps, et à l'aide duquel on peut déterminer la dis- quand sa grandeur est connue.

ACTION, INTERFÉRENCE ET ANNEAUX COLORÉS

n et franges. — La *diffraction* est une modification que subit elle rase le contour d'un corps, ou quand elle traverse une modification en vertu de laquelle les rayons lumineux parais- pénétrer dans l'ombre. Pour observer la diffraction, on fait eau de lumière solaire par une ouverture très-petite pratiquée ne chambre obscure, et on le reçoit sur une lentille conver- oyer (fig. 512). Un verre coloré en rouge est fixé à l'ouverture re, et ne laisse passer que de la lumière rouge. Un écran opaque t placé derrière la lentille, au delà de son foyer, intercepte une nineux, tandis que l'autre va se projeter sur un écran *b*. repré- B. On observe alors, en dedans de l'ombre [illegible] e *ab*, une lumière rougeâtre assez vive, qui [illegible] points de l'écran sont plus éloignés de la lu

sur la partie de l'écran qui devrait être uniformément éclairée, on remarque des alternatives de franges obscures et de franges lumineuses, qui vont en s'affaiblissant graduellement et finissent par disparaître.

Les diverses couleurs du spectre donnent naissance au même phénomène, mais avec cette différence que les franges sont d'autant plus étroites, que la lumière est moins réfrangible. Il résulte de cette dernière propriété que lorsqu'on expérimente avec de la lumière blanche, les franges de chaque couleur simple se trouvant séparées par leur inégale diffraction, celles qui se forment sur l'écran B sont irisées.

Si, au lieu d'interposer, entre la lentille L et l'écran *b*, les bords d'un corps

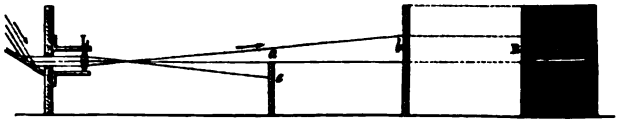


Fig. 512.

opaque, on y place un corps opaque très-étroit, comme un cheveu, ou un fil métallique très-fin, non-seulement il y a encore des franges alternativement obscures et lumineuses des deux côtés de la portion de l'écran qui correspond à l'ombre géométrique du corps, mais dans cette ombre même on aperçoit les mêmes alternatives de bandes obscures et de bandes lumineuses, c'est-à-dire qu'il se produit alors des franges extérieures et des franges intérieures.

C'est le Père Grimaldi, de Bologne, qui fit connaître, le premier, en 1663, le phénomène de la diffraction et des franges, mais sans en donner l'explication. Newton essaya d'expliquer le phénomène de la diffraction, dans le système de l'émission, en admettant une action répulsive exercée par les corps sur les rayons lumineux, ce qui n'expliquait pas les franges intérieures. Thomas Young expliqua le phénomène de la diffraction, dans le système des ondulations, en l'attribuant à l'interférence (619) des rayons directs avec les rayons réfléchis par les bords des corps opaques. Mais il résulterait de cette théorie que la formation des franges devrait dépendre de la nature du corps opaque dont la lumière rase les contours, ainsi que de son degré de poli, ce qui est contraire à l'observation. C'est Fresnel qui a expliqué le premier tous les phénomènes de la diffraction, en se fondant sur la théorie des ondes lumineuses (620).

619. **Interférence.** — On nomme *interférence* une action mutuelle qu'exercent l'un sur l'autre deux rayons lumineux, lorsque, émis par une même source, ils se rencontrent sous un très-petit angle. Cette action s'observe très-simplement au moyen de l'expérience suivante. Par deux ouvertures circulaires très-petites, de même diamètre, et peu distantes l'une de l'autre, on introduit dans une chambre obscure deux faisceaux de lumière homogène, de lumière rouge par exemple; ce qui s'obtient en fixant aux deux ouvertures de la chambre noire des verres colorés en rouge, qui ne laissent passer que cette lumière. Les deux faisceaux formant, après leur entrée dans la chambre noire, deux cônes lumineux qui vont se rencontrer à une certaine distance, on les reçoit, un peu au delà de leur point de rencontre, sur un carton blanc, et l'on remarque, dans le segment commun aux deux disques qui se forment sur cet écran, des franges obscures, formant des alternatives de rouge et de noir. Si l'on ferme l'une des deux ouvertures, les franges disparaissent et sont remplacées par une teinte rouge à peu près uniforme. De ce que les franges obscures disparaissent quand on intercepte un des faisceaux, on conclut qu'elles sont le résultat de la rencontre des deux faisceaux qui se croisent obliquement.

Cette expérience est due à Grimaldi, qui en avait tiré cette conséquence re-

ie, que de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité. Dans
ace ci-dessus, il y a diffraction, car les rayons lumineux rasent les bords
rtures; mais, sans faire intervenir ce phénomène, on peut faire inter-
ux faisceaux au moyen de l'appareil suivant, dû à Fresnel.
miroirs plans M et N (fig. 513), de métal, sont disposés à côté l'un de

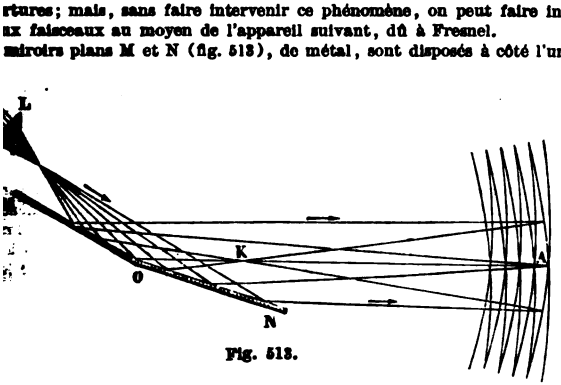


Fig. 513.

de manière à former un angle MON très-obtus. Une lentille hémicylin-
, à court foyer, concentre en avant de ces miroirs un faisceau de lu-
ge introduit dans la chambre noire, lequel tombe en partie sur l'un
irs et en partie sur l'autre. Les ondes lumineuses, après s'être réfléchies,
se rencontrer sous un très-petit angle, plus près du miroir N que du
f. Si on les reçoit alors sur un écran blanc, on observe sur celui-ci
les alternativement sombres et brillantes, parallèles à la ligne d'inter-
ées deux miroirs et symétriquement disposées des deux côtés du plan
l passe par la ligne d'intersection des miroirs, et partage en deux parties
angle que forment entre eux les rayons réfléchis.
arrête la lumière qui tombe sur l'un des miroirs, les franges disparais-
sultat identique avec celui de l'expérience précédente.
, si l'on fait passer le faisceau déjà réfléchi par l'un des miroirs au tra-
e lame de verre à faces parallèles, toutes les franges sont déplacées,
ou à gauche, d'une quantité qui augmente avec l'épaisseur de la lame.
mière expérience montre que l'action mutuelle des rayons qui se ren-
est modifiée par la substance qu'ils traversent, et l'on en déduit que la
se propage moins vite dans le verre que dans l'air.

Principe des interférences. — Le phénomène des interférences, de
e celui de la diffraction, ne peut s'expliquer dans le système de l'émis-
is Fresnel en a donné une explication complète dans le système des on-
s. Dans ce système, les molécules de l'éther étant animées d'un mouve-
va-et-vient extrêmement rapide (475), on nomme *longueur d'ondula-*
pace qu'embrassent l'aller et le retour de chaque molécule d'éther, et
dulation l'aller ou le retour seul; en sorte qu'une ondulation complète
se de deux demi-ondulations de sens contraires. Cela posé, lorsque deux
d'ondulations de même longueur et de même intensité se propagent
me même direction, si l'un des systèmes est en avance ou en retard sur
te d'un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, les deux sys-
tent pour imprimer à l'éther un mouvement dans le même sens,
é de la lumière est doublée; mais si, au contraire, un système est en
r l'autre d'un nombre impair de demi-ondulations, les mouvements
à l'éther se détruisent, et il en résulte de l'obscurité

Telle est l'explication des franges sombres et lumineuses observées dans les expériences de Grimaldi et de Fresnel. Les franges observées dans la diffraction se rapportent à la même cause.

Les deux expériences décrites ci-dessus (619) ayant été faites avec de la lumière rouge, les franges étaient alternativement noires et rouges; mais si on les répète avec de la lumière blanche, les franges sont irisées. Pour expliquer cette coloration, il faut remarquer que la largeur des franges varie avec chaque couleur simple : il en résulte que, quand on fait interférer deux faisceaux de lumière blanche, les franges dues à chaque couleur se séparent, ce qui produit l'irisation qu'on observe. On voit que cette explication est la même que celle des couleurs dans la diffraction.

621. **Longueur des ondulations, cause des couleurs.** — En mesurant avec précision l'intervalle de deux franges consécutives, dans le phénomène des interférences, Fresnel en a déduit par le calcul la longueur des ondulations de l'éther, et il a reconnu que cette longueur n'est pas la même pour tous les rayons colorés, mais va en augmentant du violet au rouge, comme le montre le tableau suivant :

Couleurs simples.	Longueur moyenne des ondulations en millionièmes de millimètre.
Violet	423
Indigo	449
Bleu	475
Vert	512
Jaune	551
Orangé	583
Rouge	620

La vitesse de la lumière par seconde étant de 77 000 lieues de 4 000 mètres (481), c'est-à-dire de 308 millions de mètres, on aura le nombre d'ondulations correspondant à chaque couleur par seconde, en cherchant combien de fois la longueur d'ondulation correspondante est contenue dans le nombre 308 millions, c'est-à-dire en divisant ce nombre par ceux du tableau ci-dessus, ce qui donne, pour le rayon violet, plus de 728 millions de millions d'ondulations par seconde, et, pour le rayon rouge, plus de 496 millions de millions. A chaque couleur simple correspondant ainsi un nombre d'ondulations qui lui est propre, on voit que c'est le nombre de vibrations que font les molécules de l'éther en un temps donné qui détermine la nature des couleurs, de même que c'est le nombre des ondes sonores qui produit les différents sons.

622. **Couleurs des lames minces, anneaux de Newton.** — Tous les corps diaphanes, solides, liquides ou gazeux, lorsqu'ils sont réduits en lames suffisamment minces, paraissent colorés de nuances extrêmement vives, surtout par réflexion. Les cristaux qui se clivent en feuilles très-minces, comme le mica, le gypse, présentent ce phénomène; il en est de même de la nacre et du verre soufflé en boule très-mince. Une goutte d'huile étalée rapidement sur une grande masse d'eau présente toutes les nuances du spectre dans un ordre constant. Une bulle de savon paraît blanche d'abord; mais à mesure qu'on l'enfle, on voit apparaître de brillantes teintes irisées, surtout à la partie supérieure, où l'enveloppe liquide qui forme la bulle est plus mince. Ces couleurs se disposent en zones concentriques horizontales autour du sommet, qui devient noir au moment où il n'a plus l'épaisseur suffisante pour réfléchir la lumière, et la bulle crève alors subitement.

Newton, qui, le premier, étudia le phénomène des anneaux colorés dans les bulles de savon, voulant constater la relation qui existe entre l'épaisseur de la lame mince, la couleur des anneaux et leur étendue, produisait ceux-ci au moyen d'une couche d'air interposée entre deux verres, l'un plan, l'autre con-

à très-long foyer (fig. 514). Les deux surfaces étant essuyées et exposées une fenêtre, à la lumière du jour, de manière à les voir par réflexion, on au point de contact une tache noire entourée d'anneaux colorés, au de six ou sept, dont les teintes s'affaiblissent graduellement (fig. 515). Si vus par transmission, le centre des anneaux est blanc, et leurs sont complémentaires de celles des anneaux par réflexion.
une lumière homogène, la couleur rouge, par exemple, les anneaux sont

Fig. 514.

Fig. 515.

ment noirs et rouges, et d'un diamètre d'autant moindre, que la cou- plus réfrangible; mais avec de la lumière blanche, les anneaux sont les différentes couleurs du spectre, ce qui provient de ce que les anneaux rentes couleurs simples, ayant des diamètres différents, les anneaux perposent pas, mais se séparent plus ou moins.
distance focale de la lentille est de 3 à 4 mètres, les anneaux peuvent r à l'œil nu; mais si le foyer est plus rapproché, il faut regarder les avec une loupe.
culant l'épaisseur de la couche d'air comprise entre la lame et la len- wton a trouvé que, *pour les anneaux obscurs, ces épaisseurs sont entre nes la suite des nombres pairs* 0, 2, 4, 6..., et que, *pour les anneaux s, ces mêmes épaisseurs varient comme la suite des nombres impairs* , 7...; ces rapports étant indépendants de la courbure de la lentille et de r des rayons qui la traversent. Il a trouvé, en outre, que l'épaisseur de e d'air interposée diminuant à mesure que la réfrangibilité augmente, éseur est de 161 millionièmes de millimètre pour le rouge extrême du ordre, c'est-à-dire correspondant au premier anneau brillant, tandis que, olet extrême, elle n'est plus que de 101 millionièmes. Pour des anneaux e ordre, c'est-à-dire de même rang, les diamètres sont d'autant plus que la couleur simple qui tombe sur la lentille est moins réfrangible.
ération des lames minces et des anneaux de Newton est un phénomène rence qui résulte de ce que les rayons qui se sont réfléchis sur la sur- face de la lame interfèrent avec ceux que la première surface a réflé- nt aux anneaux vus par réfraction, ils résultent de l'interférence des transmis directement avec les rayons qui ne sont transmis qu'après deux s intérieures sur les faces de la lame (492).
Phénomène des réseaux. — On nomme *réseau*, en optique, une série opaques et de raies transparentes très-rapprochées les unes des autres. s les traits parallèles qu'on grave au diamant, sur verre, pour former mètres (566). Les traits sont ici la partie opaque du réseau. Si l'on re- r transmission, la lumière d'une bougie à travers un pareil réseau con- 100 traits par millimètre, on aperçoit une suite de petits spectres ayant en dehors et le bleu en dedans. La même chose a lieu si l'on regarde la d'une bougie à travers les barbes d'une plume placée près de l'œil. Cette n est encore un phénomène d'interférence.

* POLARISATION

Polarisation par réflexion. — La *polarisation* est une modifica- des rayons lumineux, en vertu de laquelle, une fois réfléchis

tés, ils deviennent incapables de se réfléchir ou de se réfracter de nouveau dans certaines directions. Le nom de polarisation a été adopté pour caractériser ces nouvelles propriétés de la lumière, parce que, pour les expliquer dans la théorie de l'émission, on admet que les molécules lumineuses ont des pôles et des axes qui, par la réflexion sous un certain angle, se tournent tous dans une même direction. La polarisation a été découverte en 1810 par Malus, physicien français, mort deux ans plus tard.

La lumière se polarise par réflexion ou par réfraction. Réfléchie sur une glace de verre noir, la lumière se polarise lorsque la réflexion se produit sous un angle de 35°25′ avec la glace. Voici quelques-unes des propriétés que possède alors le rayon polarisé :

1° Ce rayon n'éprouve aucune réflexion en tombant sur une seconde lame de verre, sous le même angle de 35°25′, si le plan d'incidence sur cette seconde lame est perpendiculaire au plan d'incidence sur la première, tandis qu'il se réfléchit plus ou moins sous les autres incidences.

2° Transmis au travers d'un prisme biréfringent (628, 3°), il ne donne qu'une image, si la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan d'incidence, tandis que, dans toute autre position par rapport à ce plan, il donne deux images plus ou moins intenses.

3° Il ne peut pas se transmettre au travers d'une plaque de tourmaline (628, 1°) dont l'axe de cristallisation est parallèle au plan d'incidence, et se transmet, au contraire, d'autant plus facilement, que l'axe de la tourmaline approche davantage de la direction perpendiculaire à ce plan.

Tous les corps peuvent, comme le verre, polariser la lumière par réflexion, mais plus ou moins complétement et sous des angles d'incidence inégaux. Le marbre noir, par exemple, polarise complétement la lumière, tandis que le diamant, le verre ordinaire, le verre d'antimoine, ne la polarisent que partiellement. De tous les corps, ce sont les métaux qui ont le plus faible pouvoir polarisant.

625. **Angle et plan de polarisation.** — *L'angle de polarisation* d'une substance est l'angle que doit faire le rayon incident avec une surface plane et polie de cette substance, pour que le rayon réfléchi soit polarisé le plus complétement possible. Pour l'eau, cet angle est de 37°15′; pour le verre, de 35°25′; pour le quartz, de 32°28′; pour le diamant, de 22°; il est de 33°30′ pour l'obsidienne, espèce de verre noir naturel qui polarise très-bien la lumière.

Brewster a fait connaître, sur l'angle de polarisation, la loi suivante, remarquable par sa simplicité : *L'angle de polarisation est l'angle d'incidence pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.* Toutefois cette loi n'est pas applicable à la lumière réfléchie par les cristaux biréfringents.

Dans la polarisation par réflexion, on nomme *plan de polarisation* le plan de réflexion dans lequel la lumière se trouve polarisée; ce plan coïncide avec le plan d'incidence et contient, par conséquent, l'angle de polarisation. C'est dans ce plan que, réfléchie une première fois, la lumière ne peut se réfléchir sous l'angle de polarisation dans un plan perpendiculaire au premier; c'est encore dans ce plan qu'elle n'est pas transmissible au travers d'une tourmaline dont l'axe est parallèle au plan. Tout rayon polarisé par réfraction possède aussi un plan de polarisation, c'est-à-dire un plan dans lequel il présente les propriétés qu'on vient d'énoncer.

626. **Polarisation par simple réfraction.** — Quand un rayon de lumière non polarisée tombe sur une lame de verre à faces parallèles, sous l'angle de polarisation, il n'est qu'en partie réfléchi; l'autre partie traverse la lame en se réfractant, et la lumière transmise est polarisée partiellement dans un plan perpendiculaire au plan de réflexion, et, par conséquent, au plan de polarisation de la lumière qui a été polarisée par réflexion. Arago a observé, en outre, que le faisceau réfléchi et le faisceau réfracté contiennent une égale quantité de lumière polarisée, et que la réunion de ces deux faisceaux donne de la lumière

peut donc regarder la lumière ordinaire comme formée de deux
ux, polarisés à angle droit.
lame de verre ne polarisant jamais complétement la lumière, on
ir plusieurs qu'on superpose, et qui, par des réflexions et des réfrac-
ves, produisent un effet plus complet. Des lames de verre ainsi réu-
ce qu'on appelle une *pile de glaces*, appareil qu'on utilise fré-
ur obtenir un faisceau de lumière polarisée.

isation par double réfraction. — La lumière se polarise par
tion, lorsqu'elle traverse un cristal de spath d'Islande ou de toute
ce biréfringente; les deux faisceaux, distincts à leur émergence,
deux polarisés entièrement, mais dans des plans différents, qui
ent ou très-sensiblement perpendiculaires entre eux. Pour le dé-
regarde au travers d'un rhomboèdre de spath d'Islande un point
r une feuille de papier. A l'œil nu, on aperçoit deux images qui
même éclat; mais si l'on interpose une tourmaline qu'on fait tour-
propre plan, chaque image disparaît et reparaît deux fois dans une
la tourmaline, ce qui fait voir que les deux rayons émergents sont
s des plans perpendiculaires entre eux (628, 2°). En effet, l'image
eint au moment où l'axe de la tourmaline est parallèle à la sec-
le de la surface d'incidence, et l'image extraordinaire, au moment
axe est perpendiculaire à cette même section; on conclut de là que
rdinaire est polarisé dans le plan de la section principale, et le
aordinaire dans un plan perpendiculaire à cette section.

iscopes ou analyseurs. — On nomme *polariscopes*, ou *analyseurs*,
ruments qui servent à reconnaître quand la lumière est polarisée
ier son plan de polarisation. Les analyseurs les plus usités sont la
e noir, la tourmaline en plaque mince, le prisme biréfringent, le
ol et les piles de glace décrites ci-dessus (626).

ire. — On verra ci-après, dans l'appareil que représente la figure 519,
noire *m* fait reconnaître si la lumière est polarisée en refusant de
us l'angle de polarisation, quand le plan d'incidence sur cette glace
ulaire au plan de polarisation; la glace *m* est donc un analyseur.

line. — L'analyseur le plus simple est une lame de tourmaline
e parallèlement à son axe de cristallisation. Ce minéral, qui est
a la propriété de ne laisser passer que la lumière naturelle et la
isée dans un plan perpendiculaire à son axe; mais il se comporte
ps opaque à l'égard de la lumière polarisée dont le plan de polari-
allèle à cet axe. Pour se servir de cet analyseur, on l'interpose entre
isceau lumineux qu'on veut observer, puis on tourne lentement la
ans son propre plan : si alors le faisceau présente toujours la même
e contient pas de lumière polarisée; mais si l'éclat décroît et croît
it, le faisceau contient d'autant plus de lumière polarisée, qu'il
ariations d'intensité plus considérables. Au moment du minimum,
larisation est déterminé par l'axe de la tourmaline et par le rayon
e rayon extraordinaire qui passe dans une tourmaline taillée paral-
axe; le rayon ordinaire est complétement absorbé, du moins si la
t suffisamment colorée.

biréfringent. — On construit, avec le spath d'Islande, des prismes
qui sont employés comme analyseurs dans plusieurs instruments
tamment dans l'appareil de Biot pour étudier la polarisation circu-
). Il est nécessaire que ces prismes soient achromatisés; car lorsque
il les traverse n'est pas simple, elle est décomposée par la réfrac-
a, on accole au prisme de spath un prisme de verre, d'un
ant la lumière en sens contraire, il détruit à peu
le la dispersion. On obtient le maximum d'écart e

ordinaire et extraordinaire en taillant le prisme biréfringent de manièr arêtes soient parallèles ou perpendiculaires à l'axe optique du cristal.

Le prisme biréfringent étant fixé à l'extrémité d'un tube de cuivre (on reconnaît qu'un faisceau lumineux qu'on fait passer dans ce tube plétement polarisé, quand, en tournant le tube sur l on trouve, pendant une révolution complète, quatre rectangulaires où l'on n'aperçoit qu'une image. C'est l' dinaire qui disparaît quand le plan de la section prin perpendiculaire au plan de polarisation, et c'est l'ima ordinaire qui s'éteint toutes les fois que le plan de po coïncide avec la section principale. Dans toutes les a sitions du prisme biréfringent, l'intensité relative d varie. Le prisme biréfringent peut servir à déterminer tion du plan de polarisation, puisqu'il suffit de cherch tion de la section principale du prisme pour laquelle, le faisceau incid normal, l'image extraordinaire s'éteint.

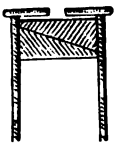


Fig. 516.

4° *Prisme de Nicol.* — Le prisme de Nicol est l'analyseur le plus parce qu'il est tout à fait incolore, qu'il polarise complétement la lu qu'il ne transmet qu'un seul rayon polarisé dans la direction de son

Pour le construire, on prend un rhomboèdre de spath d'Islande de 20 limètres de hauteur environ, sur 8 à 9 de largeur, et on le coupe en vant un plan perpendiculaire au plan des grandes diagonales des bas sant par les sommets obtus les plus rapprochés l'un de l'autre, puis

Fig. 517.

les deux moitiés dans le même ordre avec du baume de Canada. Le p pède ainsi construit constitue le prisme de Nicol (fig. 517).

L'indice de réfraction du baume de Canada étant plus petit que l'in naire du spath d'Islande, mais plus grand que son indice extraordina résulte qu'un faisceau lumineux SO (fig. 518) pénétrant dans le prisme, le rayon ordinaire éprouve sur la surface *ab* la réflexion totale, et prend la direction CdO, tandis que le rayon extraordinaire Ce passe seul; c'est-à-dire que le prisme de Nicol, de même que la tourmaline, ne laisse passer que le rayon extraordinaire. Il peut donc servir d'analyseur comme la tourmaline. On l'utilise aussi, sous le nom de *polariseur*, pour obtenir ceau de lumière blanche polarisée. Le prisme biréfringent sert au mê

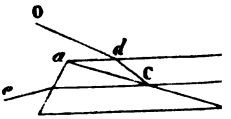


Fig. 518.

629. **Appareil de Noremberg.** — Noremberg a imaginé un appar et peu dispendieux, à l'aide duquel on peut répéter la plupart des e relatives à la lumière polarisée. Cet appareil se compose de deux colo *d* de cuivre (fig. 519), qui soutiennent une glace non étamée *n*, mob d'un axe horizontal. Un petit cercle gradué *c* indique l'angle de cette la verticale. Entre les pieds des deux colonnes est une glace étamée horizontale. A leur extrémité supérieure, ces mêmes colonnes supportent gradué, dans lequel peut tourner un disque *o*. Celui-ci, au centre une ouverture quadrangulaire, porte une glace de verre noir *m*, fai la verticale un angle égal à l'angle de polarisation. Enfin, un disque

peut se fixer, par une vis de pression, à différentes hauteurs sur les Un deuxième anneau a, soutenu par le premier, peut prendre autour horizontal différentes inclinaisons, et porte un écran noir e, percé à e d'une ouverture circulaire.

ce n faisant avec la verticale un angle de 35°25′, c'est-à-dire égal

Fig. 519.

Fig. 520.

de polarisation du verre, les rayons Sn, qui rencontrent cette glace ngle, se polarisent (624) en se réfléchissant dans la direction np, vers p, qui les renvoie dans la direction pnr. Après avoir traversé la le faisceau polarisé tombe sur la glace noire m sous un angle de 35° 25′, ette glace fait précisément le même angle avec la verticale. Or, si l'on ner horizontalement le disque o auquel est fixée la glace m, celle-ci se n conservant toujours la même inclinaison, et l'on remarque deux où elle ne réfléchit pas le faisceau incident nr : c'est lorsque le plan e, sur cette glace, est perpendiculaire au plan d'incidence Snp sur la l'elle est la position représentée dans le dessin. Dans toute autre posi- aisceau polarisé est réfléchi par la glace m en quantité variable, et le de lumière réfléchie a lieu lorsque les plans d'incidence, sur les glaces ont parallèles entre eux. Si la glace m fait avec la verticale un angle d ou plus petit que 35°25′, le faisceau polarisé est toujours réfléchi es les positions du plan d'incidence.

Si, au lieu de recevoir la lumière polarisée sur la glace noire *m*, on la reçoit sur un prisme biréfringent (628, 3°) placé dans un tube *g* (fig. 520), on n'obtient qu'une image toutes les fois que le plan de la section principale du prisme coïncide avec le plan de polarisation sur la glace *m*, et c'est alors le rayon ordinaire qui est transmis. On ne voit encore qu'une image quand le plan de la section principale est perpendiculaire au plan de polarisation, et c'est alors le rayon extraordinaire qui passe. Pour toute autre position du prisme, on voit deux images dont l'intensité varie avec la position de la section principale.

Enfin, si l'on substitue une tourmaline au prisme biréfringent, et qu'on la fasse tourner sur elle-même, le faisceau polarisé s'éteint complètement lorsque l'axe de la tourmaline est parallèle au plan d'incidence Sap.

Les différentes propriétés de la lumière polarisée énoncées précédemment (624, 1°, 2°, 3°) se trouvent donc ainsi démontrées. On va voir d'autres applications de l'appareil de Noremberg à l'étude de la polarisation rotatoire dans le quartz, et à l'observation des couleurs de la lumière polarisée.

* POLARISATION ROTATOIRE

630. **Rotation du plan de polarisation.** — Lorsqu'un rayon polarisé traverse une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe de cristallisation, ce rayon est encore polarisé à l'émergence, mais non plus dans le même plan de polarisation qu'avant son passage dans le quartz. Avec certains échantillons, le nouveau plan est tourné à gauche de l'ancien; avec d'autres, il l'est à droite. C'est à ce phénomène qu'on a donné le nom de *polarisation rotatoire*. Il a été observé d'abord par Seebeck et Arago; mais il a été étudié surtout par Biot, qui a fait connaître les lois suivantes :

1° *La rotation du plan de polarisation n'est pas la même pour les diverses couleurs simples; elle est d'autant plus grande, que ces couleurs sont plus réfrangibles.*

2° *Pour une même couleur simple et pour des plaques d'un même cristal, la rotation est proportionnelle à l'épaisseur.*

3° *Dans la rotation de droite à gauche ou de gauche à droite, la même épaisseur imprime sensiblement la même rotation.*

On a nommé *dextrogyres* les substances qui tournent à droite : telles sont le sucre de canne en dissolution dans l'eau, l'essence de citron, la solution alcoolique de camphre, la dextrine et l'acide tartrique; et l'on a appelé *lévogyres* les substances qui tournent à gauche, comme l'essence de térébenthine, l'essence de laurier, la gomme arabique.

631. **Coloration produite par la polarisation circulaire** — Quand on regarde avec un prisme biréfringent une lame de quartz de quelques millimètres d'épaisseur, taillée perpendiculairement à l'axe, et traversée par un faisceau de lumière polarisée, on observe deux images vivement colorées dont les teintes sont complémentaires (545); car, en se recouvrant par leurs bords, elles donnent du blanc (fig. 521). En tournant alors le prisme, les deux images changent de teintes et prennent successivement toutes les couleurs du spectre, tout en continuant à être complémentaires.

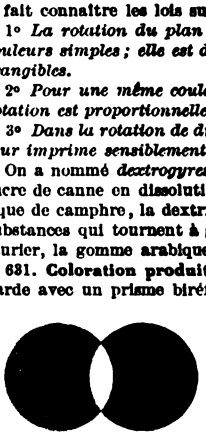


Fig. 521.

Ce phénomène est une conséquence de la première loi sur la polarisation circulaire (630, 1°). En effet, Biot ayant reconnu que le quartz fait tourner le plan de polarisation du rayon rouge de près de 17°30′, et celui du rayon violet de 44°5′, il résulte de la grande différence de ces deux angles que, lorsque la lumière polarisée qui a traversé la plaque de quartz émerge, les diverses couleurs simples qu'elle renferme sont polarisées dans des plans différents. Par conséquent,

ceau ainsi transmis par le quartz est reçu à travers un prisme
il le décompose en deux autres polarisés à angle droit (627), les
rs simples se partagent inégalement entre les deux images ordi-
ordinaire fournies par le prisme; d'où il résulte que ces images
ment complémentaires, les couleurs qui manquent à l'une se re-
l'autre.

mes de coloration s'observent très-bien avec l'appareil de Norem-
Pour cela, on place sur l'écran *e* (fig. 520) une plaque de quartz *s*,
iculairement à l'axe et fixée dans un disque de liége, puis, la
9) étant inclinée de manière à faire passer dans le quartz un fais-
n regarde au travers d'un prisme biréfringent *g* (fig. 520), et en fai-
tube dans lequel est ce prisme, on observe les images complémen-
par le passage dans le quartz de la lumière polarisée (fig. 521).

r rotatoire des liquides. — Le quartz est la seule substance
uelle on ait observé la polarisation circulaire; mais Biot l'a re-
n grand nombre de liquides et de dissolutions. Le même savant
utre, que le déplacement du plan de polarisation peut faire con-
rences de composition dans des corps où l'on n'en distingue au-

Fig. 522.

lyse chimique. Par exemple le sucre de raisin fait tourner à
de polarisation, tandis que le sucre de canne le fait tourner à
la composition chimique des deux sucres soit la même.

que le pouvoir rotatoire des liquides est beaucoup moindre que
. Dans le sirop de sucre de canne concentré, qui est un des li-
dent le pouvoir rotatoire au plus haut degré, ce
oindre que dans le quartz; d'où il résulte qu'où

vernier et qui marque le nombre de degrés dont on
position du miroir *m*, le plan de polarisation *Sod* du
tical, et le zéro de la graduation sur le cercle *h* est

Avant qu'on ait placé le tube *d* dans la gouttière
fournie par le prisme biréfringent s'éteint toutes les fo
pond au zéro de la graduation, parce qu'alors le pris
tourné de manière que sa section principale coïncide av
(628, 3°). Il en est encore de même quand le tube *d* est pl
liquide *inactif*, comme l'alcool, l'éther. ce qui montre
tion n'a pas tourné. Mais si on remplit le tube d'une
canne, ou de tout autre liquide *actif*, l'image extraor
l'éteindre il faut tourner l'alidade d'un certain angl
suivant que le liquide est lévogyre ou dextrogyre; ce
de polarisation a tourné du même angle. Avec la disso
la rotation a lieu vers la droite, et si, avec une même
tubes plus ou moins longs, on trouve que la rotation
à la longueur, ce qui est conforme à la deuxième loi de
un tube de longueur constante, on prend des dissolutio
en sucre, la rotation croît comme la quantité de sucre
de déviation on peut déduire l'analyse quantitative d'

Il importe d'opérer avec de la lumière simple; car,
spectre possédant des pouvoirs rotatoires différents, l
composée en traversant un liquide actif, et l'image ex
complétement dans aucune position du prisme biré
change de teinte. Pour obvier à cet inconvénient, on p
l'œil et le prisme biréfringent, un verre coloré en rou
lequel ne laisse passer que de la lumière rouge. L'ima
alors toutes les fois que la section principale du pris
de polarisation du faisceau rouge.

633. **Saccharimètre de Soleil.** — Soleil a utilisé
liquides pour construire un appareil destiné à analyse
fères; d'où le nom de *saccharimètre* donné à cet appa

La figure 523 représente le saccharimètre fixé horiz

ıner à la substance compensatrice, qui est une plaque de quartz une compensation parfaite.

on peut distinguer dans l'appareil trois parties principales : un ent le liquide à analyser, un polariseur et un analyseur.

, qui renferme le liquide, est de cuivre étamé intérieurement, et

Fig. 523 (h=47).

eux extrémités par deux glaces à faces parallèles; il est soutenu rt k, qui se termine à ses deux bouts par deux tubes r et a, dans es cristaux qui servent de polariseurs et d'analyseurs, et qui sont ns la coupe (fig. 524).

ifice S se place une lampe ordinaire à modérateur. La lumière émise po, dans la direction de l'axe de l'instrument, rencontre d'abord fringent r, qui sert de polariseur (528, 3°). L'image ordinaire seule l'image extraordinaire étant projetée hors du champ de la vision, mplitude de l'angle que font entre eux le rayon ordinaire et le dinaire. Enfin le prisme biréfringent est dans une position telle, polarisation est vertical et passe par l'axe de l'appareil.

du prisme biréfringent, le faisceau polarisé rencontre une plaque double rotation, c'est-à-dire que cette plaque tourne à la fois le sation à droite et à gauche. Pour cela, elle est formée de deux rtz de rotations contraires, juxtaposées comme le montre la figure que la ligne de séparation soit verticale et dans le même plan que areil. Ces quartz, taillés perpendiculairement à l'axe, ont une mm,75, à laquelle correspond une rotation de 90°, et donnent une lacée qui est la *teinte de passage*. Le quartz, qu'il soit dextrogyre ournant toujours d'une même quantité, à épaisseur égale (630, 3°), ue les deux quartz a et b font tourner également le plan de po- n à droite, l'autre à gauche. Par conséquent, si de e biréfringent, ils présentent exactement la mêm

Après avoir traversé le quartz q, le faisceau polarisé passe dans le liquide que contient le tube m, et de là rencontre une nouvelle plaque de quartz i, simple et d'épaisseur arbitraire, dont on va voir bientôt l'usage.

En n est le compensateur destiné à détruire la rotation de la colonne liquide m. Il est formé de deux quartz ayant la même rotation, soit à droite, soit à gauche, mais contraire à celle de la plaque i. Ces deux quartz, représentés en coupe dans la figure 525, s'obtiennent en coupant obliquement une plaque de quartz à faces parallèles, de manière à former deux prismes de même angle N, N; en juxtaposant ensuite ces deux prismes, comme le représente la figure,

Fig. 524.

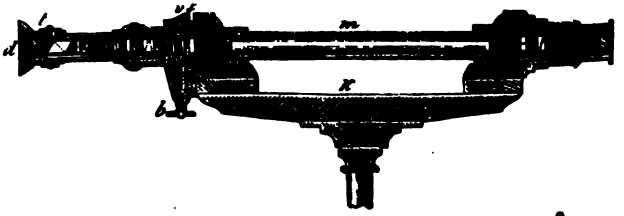


Fig. 525.

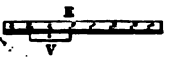


Fig. 526.

Fig. 527.

il en résulte une seule plaque à faces parallèles, qui offre l'avantage de pouvoir varier d'épaisseur. Pour cela, chaque prisme est fixé à une coulisse, de façon à pouvoir glisser dans un sens ou dans l'autre, tout en conservant aux faces homologues leur parallélisme. Ce mouvement s'obtient au moyen d'une double crémaillère et d'un pignon qu'on tourne à l'aide d'un bouton b (fig. 523 et 524).

Quand les lames se déplacent respectivement dans le sens indiqué par les flèches (fig. 525), il est évident que la somme de leurs épaisseurs augmente, et qu'elle diminue quand les plaques avancent dans le sens opposé. Une échelle e et un vernier v (fig. 523) suivent les plaques dans leur mouvement, et servent à mesurer les variations d'épaisseur du compensateur. Cette échelle, représentée ainsi que son vernier dans la figure 526, porte deux divisions ayant un zéro commun, l'une de gauche à droite, pour les liquides dextrogyres, l'autre de droite à gauche, pour les liquides lévogyres.

Lorsque le vernier est au zéro de l'échelle, la somme des épaisseurs des plaques N, N est précisément égale à celle de la plaque i, et comme la rotation de cette dernière est contraire à celle du compensateur, l'effet est nul. Mais si l'on fait marcher dans un sens ou dans l'autre les plaques du compensateur, celui-ci ou le quartz i l'emporte, et il y a rotation à droite ou à gauche.

Après le compensateur est un prisme biréfringent c (fig. 524) servant d'analyseur pour observer le faisceau polarisé qui a traversé le liquide et les diverses plaques de quartz. Pour comprendre plus facilement l'objet du prisme c, nous négligerons pour un instant les cristaux et les lentilles représentés à sa gauche dans le dessin. Si l'on fait d'abord coïncider le zéro du vernier v avec celui de l'échelle, et si le liquide contenu dans le tube est inactif, les actions du compensateur et de la plaque i se détruisent, et, l'effet du liquide étant nul, les deux moitiés de la plaque q, vues au travers du prisme c, donnent rigoureusement la même teinte, ainsi qu'on l'a déjà observé. Mais si l'on remplace le tube plein de liquide inactif par un second tube rempli d'une dissolution sucrée, la

ir rotatoire de celle-ci s'ajoute à celui de même sens de l'un des quartz de que à double rotation q, et diminue d'autant le pouvoir rotatoire de l'autre . Il résulte de là que les deux moitiés de la plaque q ne présentent plus me teinte, et que la moitié a (fig. 527) est rouge, par exemple, tandis moitié b est bleue. On fait alors marcher les prismes du compensateur, rnant le bouton b vers la droite ou vers la gauche, jusqu'à ce que la dif- e d'action du compensateur et de la plaque i compense le pouvoir rotatoire dissolution, ce qui a lieu lorsque les deux moitiés de la plaque q à double on reviennent à leur teinte primitive.

nt au sens de la déviation et à l'épaisseur du compensateur, on les mesure déplacement relatif de l'échelle e et du vernier v. Les divisions de l'échelle ellps, que dix de ces divisions correspondent à une variation de 1 millimètre 'épaisseur du compensateur, et comme le vernier donne lui-même les dixièmes divisions, il en résulte qu'il mesure des variations de $\frac{1}{100}$ de millimètre l'épaisseur du compensateur.

e fois que la teinte des deux moitiés de la plaque q est bien égale et la qu'avant l'interposition de la dissolution sucrée, on lit sur l'échelle à division correspond le vernier, et le nombre correspondant donne immé- ment le titre de la dissolution. Pour cela, on se fonde sur ce principe que 71 de sucre candi bien desséché et bien pur, étant dissous dans l'eau, et eur étant amenée au volume de 100 centimètres cubes et observée dans un de 20 centimètres de longueur, la déviation produite est précisément celle emporte une épaisseur de quartz de 1 millimètre. Cela posé, pour faire l'a- e d'un sucre brut, on adopte toujours un poids normal de 16gr,471 de sucre fait dissoudre dans de l'eau, et le volume de la dissolution étant amené à entimètres cubes, on en remplit le tube de 20 centimètres de longueur, et bserve le nombre indiqué par le vernier, quand on a retrouvé la teinte pri- . Ce nombre étant, par exemple, 42, on en conclut que cette dissolution ent, de sucre cristallisable, 42 pour 100 de ce que contenait la dissolution ere candi, et, par conséquent, $16^{gr},471 \times \frac{42}{100}$, ou $6^{gr},918$. Toutefois ce ré- t n'est exact qu'autant qu'on est assuré que le sucre soumis à l'expérience pas mélangé de sucre incristallisable, ou d'une autre substance lévogyre. on a recours à l'*inversion*, c'est-à-dire qu'on transforme, au moyen de e chlorhydrique, le sucre cristallisable, qui est dextrogyre, en sucre incris- isable, qui est lévogyre; puis on fait une nouvelle opération qui, combinée la première, donne la quantité de sucre cristallisable.

eous reste à faire connaître l'usage des cristaux et des lentilles o, g, f, a, e à la suite du prisme c (fig. 524). Leur ensemble forme ce que Soleil a é le *producteur des teintes sensibles*. En effet, la teinte la plus sensible, -à-dire celle qui permet de distinguer une différence très-faible dans la colo- n des deux moitiés de la plaque à rotation, n'est pas la même pour tous eux; pour le plus grand nombre, c'est une nuance d'un bleu violacé qui rap- celle de la fleur de lin. Il importe donc de produire facilement cette teinte ou autre plus sensible à l'œil de l'observateur. Pour cela, en avant du prisme d'abord une plaque de quartz o taillée perpendiculairement à l'axe, puis petite lunette de Galilée (574), formée d'un verre biconvexe g et d'un verre nave f, pouvant se rapprocher entre eux, ou s'écarter suivant la distance vue distincte de l'observateur. Enfin l'appareil se termine par un prisme tif a, qu'on tourne à volonté sur lui-même. Le prisme biréfringent c agis- comme polariseur par rapport au quartz o, et le prisme a comme analy- lorsqu'on tourne ce dernier à droite ou à gauche, la lu- le prisme c et la plaque o change de teinte (631), et que l'expérimentateur a adoptée pour teinte fixe.

sente 2gr,256 de sucre. Donc, pour obtenir la quantité de sucre cont
urine donnée, il faut multiplier 2gr,256 par le nombre qu'indique
moment où l'on retrouve la teinte primitive.

* COULEURS PRODUITES PAR L'INTERFÉR
DES RAYONS POLARISÉS

635. Lois de l'interférence des rayons polarisés. — Après
de la polarisation, Arago et Fresnel cherchèrent si les rayons pol
taient entre eux les mêmes phénomènes d'interférence que les ray
risés, et ce fut ainsi qu'ils arrivèrent à découvrir les lois suivant
férence de la lumière polarisée, et en même temps les brillants p
coloration décrits ci-après (636 à 641).

1re LOI. — *Deux rayons polarisés dans le même plan interfèrent
solument comme deux rayons naturels.*

2e LOI. — *Deux rayons polarisés dans deux plans perpendicu
fèrent pas dans le cas où interféreraient deux rayons naturels.*

3e LOI. — *Deux rayons polarisés d'abord dans des plans perpend
vent être amenés dans le même plan de polarisation, sans acqué
la propriété d'interférer entre eux.*

4e LOI. — *Deux rayons polarisés dans des plans perpendiculaire
ensuite au même état de polarisation, interfèrent comme la lumi
s'ils ont été primitivement polarisés dans un même plan.*

5e LOI. — *Dans les phénomènes d'interférence par des rayons q
double réfraction, le lieu des franges colorées n'est pas détermin
par la différence des routes ou des vitesses; car il faut tenir compt
ondulation en plus ou en moins, suivant que l'on considère le pla
tion extraordinaire ou ordinaire.*

Ces lois donnent l'explication des diverses circonstances dans
rayons polarisés donnent ou ne donnent pas lieu aux phénomènes
qui vont être décrits.

636. **Teintes produites par la lumière polarisée en traverse
minces biréfringentes.** — En étudiant les propriétés de la lum

est celui de Noremberg (fig. 519 et 520). En g (fig. 520) est un prisme biréfringent, ou une tourmaline, ou un prisme de Nicol. La plaque mince cristallisée est placée sur l'écran e, ou en p, sur la glace étamée; mais il est à remarquer que, dans ce dernier cas, la lumière polarisée sur la glace non étamée n traverse deux fois la lame cristallisée placée en p, et que par suite on obtient le même effet que si la plaque, n'étant traversée qu'une fois par la lumière polarisée, avait une épaisseur double.

L'analyseur placé en g étant un prisme biréfringent, on a vu (629) que tant qu'aucune lame cristallisée n'est encore placée sur l'appareil, le faisceau polarisé sur la glace n et renvoyé vers le prisme le traverse en subissant une double réfraction, d'où l'œil placé au-dessus voit deux images de l'ouverture e percée au centre du diaphragme a. Ces deux images sont blanches et d'intensités inégales, et en faisant tourner le prisme sur son support, chacune d'elles s'affaiblit successivement et s'éteint toutes les fois que la section principale du prisme devient perpendiculaire ou parallèle au plan de polarisation du faisceau.

Cela posé, lorsqu'on interpose au-dessous du prisme une lame biréfringente, taillée parallèlement à l'axe, voici les phénomènes qu'on observe :

1° La section principale de la lame étant parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation du faisceau, l'œil aperçoit toujours deux images blanches qui subsistent, lorsqu'on fait tourner le prisme biréfringent, les mêmes variations d'intensité que si la lame n'existait pas.

2° Lorsque la section principale de la lame n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan de polarisation, les deux images sont colorées, et leurs couleurs sont complémentaires; car lorsqu'elles se superposent par leurs bords, la partie commune est blanche.

3° La lame restant fixe, si l'on fait tourner le prisme, les teintes des images ne changent pas, mais leur intensité varie, et le maximum d'éclat a lieu quand la section principale du prisme fait avec celle de la lame un angle de 45 ou de 135 degrés, c'est-à-dire dans les positions intermédiaires à celles qui correspondent au cas où les deux images sont blanches; de plus, les images échangent successivement leurs couleurs, en passant par le blanc, ce qui a lieu lorsque les sections principales du prisme et de la lame sont parallèles ou perpendiculaires entre elles.

En employant pour analyseur une tourmaline ou un prisme de Nicol au lieu d'un prisme biréfringent, on observe encore les mêmes phénomènes de coloration, seulement on n'a qu'une image.

627. Influence de l'épaisseur des lames. — Pour des lames de même substance, les teintes changent avec l'épaisseur et diminuent d'intensité à mesure que les lames sont plus épaisses. Il est même une limite d'épaisseur au delà de laquelle on n'obtient plus de coloration. Pour le mica, cette limite est de 88 centièmes de millimètre; pour la chaux sulfatée et le cristal de roche, de 45 centièmes; et pour le spath d'Islande, de 25 millièmes. C'est ce qui rend la coloration très-difficile à obtenir avec cette substance, à cause de la difficulté de la tailler à lames assez minces. Au contraire, pour le mica et la chaux sulfatée, qui se fendent facilement en lames extrêmement minces, l'expérience réussit très-bien. On obtient d'une même lame des teintes différentes, en l'inclinant plus ou moins par rapport au faisceau polarisé qui la traverse. Cela revient, en effet, à faire varier son épaisseur.

Pour une même substance, avec des lames d'épaisseur croissante, les teintes suivent les mêmes lois que les teintes des anneaux colorés de Newton, correspondant à des couches d'air de plus en plus épaisses (622); seulement l'épaisseur de la lame cristallisée doit l'emporter de beaucoup sur celle de la couche d'air. En effet, pour une teinte de même ordre, l'épaisseur du mica doit être [illegible] fois celle de la couche d'air; pour le cristal de roche et l'[illegible] fois; et pour le spath d'Islande, 13 fois seulement.

628. Théorie de la coloration produite par la lumière po[illegible]

fondant sur la théorie des ondulations, Fresnel a donné une explication simple et complète des teintes produites par la lumière polarisée lorsqu'elle traverse des lames biréfringentes, en faisant voir que ces teintes ont pour cause l'inégale vitesse des rayons ordinaire et extraordinaire, après qu'ils ont traversé la lame biréfringente, inégalité d'où résultent, entre les deux systèmes d'ondulations, des retards ou des avances qui les placent dans des conditions convenables pour interférer, et par suite pour développer des couleurs (620).

639. Anneaux colorés produits par la lumière polarisée en traversant les lames biréfringentes. — Dans l'expérience faite avec l'appareil de Norembergh et décrite précédemment (629), la lame cristallisée étant traversée perpendiculairement à ses faces par un faisceau de lumière parallèle, toutes les parties de la lame agissent de la même manière, et l'on a partout la même teinte. Or les effets ne sont plus les mêmes lorsque les rayons incidents traversent la lame sous des obliquités différentes; car cela revient à des épaisseurs inégales, d'où résultent des anneaux tout à fait semblables à ceux de Newton (622).

Le meilleur appareil pour observer ces nouveaux phénomènes est la *pince à tourmalines*. On nomme ainsi un petit instrument qui se compose de deux tourmalines taillées parallèlement à l'axe, et enchâssées chacune dans un disque de cuivre. Ces deux disques, qui sont percés à leur centre et noircis, sont eux-mêmes montés dans deux anneaux de fil de cuivre argenté, lequel s'enroule sur lui-même comme le montre la figure 529, de manière à former ressort et à faire appliquer l'une contre l'autre les deux tourmalines. Celles-ci tournant avec les disques, on les dispose, à volonté, de sorte que leurs axes soient parallèles ou perpendiculaires entre eux.

Le cristal sur lequel on veut expérimenter étant fixé au centre d'un disque de liége (fig. 528), on place celui-ci entre les deux tourmalines, puis on applique la pince en avant de l'œil de manière à recevoir la lumière diffuse du ciel. La tourmaline opposée à l'œil agit alors comme polariseur, et l'autre comme analyseur (628). Si le cristal qu'on observe ainsi, étant à un seul axe et taillé perpendiculairement à l'axe, est éclairé par une lumière simple, de la lumière rouge, par exemple, on voit se produire une série d'anneaux circulaires alternativement rouges et obscurs. Avec une autre couleur simple, on obtient des anneaux semblables, mais leur diamètre augmente avec la réfrangibilité de la couleur. Au contraire, le diamètre des anneaux diminue quand l'épaisseur des lames augmente, et au delà d'une certaine épaisseur il ne s'en produit plus. Si, au

Fig. 528.

Fig. 529.

lieu d'éclairer les lames avec de la lumière homogène, on les éclaire avec de la lumière blanche, comme les anneaux de différentes teintes qui se produisent alors n'ont pas le même diamètre, ils se superposent en partie, en produisant des anneaux irisés très-brillants.

La position du cristal est sans influence sur les anneaux; mais il n'en est pas de même de la position relative des deux tourmalines. Par exemple, en expérimentant sur un spath d'Islande taillé perpendiculairement à l'axe, et de 1 à 20 millimètres d'épaisseur, lorsque les axes des tourmalines sont perpendiculaires entre eux, on observe une belle série d'anneaux vivement colorés et traversés par une croix noire (fig. 530); si les axes sont parallèles, les anneaux se colorent de teintes complémentaires de celles qu'ils avaient d'abord, et ils sont alors traversés par une croix blanche (fig. 531).

ur se rendre compte de la formation des anneaux par la lumière polarisée
aversant les lames biréfringentes, il faut observer que, dans le cas que
considérons, ces lames sont traversées par un faisceau conique convergent
le sommet est l'œil de l'observateur. D'où il suit que l'épaisseur de la lame
ivent traverser les rayons augmente avec leur divergence, mais que pour

Fig. 530.

Fig. 531.

Fig. 532.

ayons de même obliquité, cette épaisseur est la même; d'où résultent des
nces de vitesse du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire qui expli-
; la formation des couleurs et leur disposition circulaire autour de l'axe du
au et du cristal. Quant à la croix noire, elle est due à ce que la lumière
isée est absorbée dans le plan de la section principale de la tourmaline et
le plan perpendiculaire.

.bserve des effets analogues avec tous les cristaux à un axe, comme la tour-
ne, l'émeraude, le corindon, le béryl, le phosphate de plomb, le prussiate
ssé, le cristal de roche. Toutefois, avec ce dernier, la croix disparaît par
ît de polarisation rotatoire (631).

b. Anneaux dans les cristaux à deux axes. — Dans les cristaux à deux
, il se produit encore des anneaux colorés, mais d'une forme plus compli-
Les bandes colorées, au lieu d'être circulaires et concentriques, présentent

Fig. 533.

Fig. 534.

Fig. 535.

la forme de courbes à deux centres, le centre de chaque système corres-
nt à l'un des axes du cristal. Les figures 533, 534 et 535 représentent les
s que donne avec la pince à tourmalines l'azotate de potasse taillé per-
ulairement à l'axe. Quand les axes des deux tourmalines sont rectangu-
, on a la figure 533; puis, en tournant lentement le cristal, sans changer
rmalines, on passe par la figure 534, pour arriver à la figure
a tourné de 45 degrés. Si les axes des tourmalines sont parall
es mêmes courbes colorées, mais leurs teintes sont supplémen

croix noire se change en croix blanche. Si l'angle des deux axes du cristal dépasse 20 à 25 degrés, on ne peut voir à la fois les deux systèmes de courbes; c'est ce qui arrive pour l'aragonite, qui donne la figure 532.

Herschel, qui a mesuré les anneaux donnés par les cristaux à deux axes, les rapporte au genre de courbe connu en géométrie sous le nom de lemniscate.

641. **Coloration produite par le verre trempé ou comprimé.** — Le verre ordinaire n'est pas doué de la double réfraction; mais il acquiert cette propriété si, par une cause quelconque, son élasticité est modifiée dans une direction

Fig. 536.

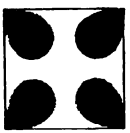


Fig. 537.

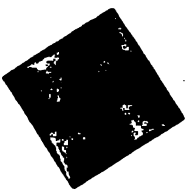
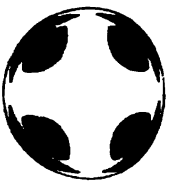


Fig. 538.



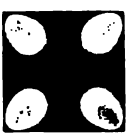


Fig. 539.

Fig. 540.

Fig. 541.

plus que dans l'autre. Pour cela il suffit de le comprimer fortement dans un sens, de le courber ou de le tremper, c'est-à-dire de le refroidir rapidement après l'avoir chauffé. Si le verre est alors traversé par un faisceau de lumière polarisée, on obtient des effets de coloration tout à fait analogues à ceux observés ci-dessus dans les cristaux biréfringents, mais beaucoup plus variés, selon la forme circulaire, carrée, rectangulaire, triangulaire, qu'on donne aux plaques de verre, et suivant le degré de tension de leurs molécules.

Le polariseur étant une glace noire sur laquelle on reçoit la lumière des nues, et l'analyseur un prisme de Nicol au travers duquel on regarde les plaques de verre traversées par la lumière polarisée, les figures 536, 537 et 539 représentent les images qu'on observe en faisant tourner successivement, dans son propre plan, une plaque carrée de verre trempé. Les figures 538 et 541 représentent les images que donne une plaque circulaire, et la figure 540 celle fournie par deux plaques rectangulaires superposées, image qui varie, lorsqu'on fait tourner le système de plaques. Les verres comprimés, ou courbés, présentent des effets de même genre, qui varient dans les mêmes conditions.

642. **Polarisation de la chaleur.** — De même que la lumière, la chaleur peut se polariser par réflexion et par réfraction (624); mais les recherches à ce sujet présentent de grandes difficultés. Les premières furent faites en 1810 par Bérard et Malus lui-même; ce dernier étant mort, Bérard les continua seul.

Dans les expériences de ce savant, les rayons calorifiques réfléchis sur une première glace étaient reçus sur une deuxième, comme dans l'appareil de Noremberg (fig. 519), et de là tombaient sur un réflecteur métallique qui les concentrait sur la boule d'un thermomètre différentiel. Bérard observa ainsi un minimum d'intensité quand le plan de réflexion sur la seconde glace était perpendiculaire au plan de réflexion sur la première. Ce phénomène étant le même que celui que présente la lumière dans la même expérience (624), Bérard en conclut que la chaleur se polarisait en se réfléchissant sur la première glace.

Melloni a appliqué son thermo-multiplicateur à l'étude de la polarisation de la chaleur, et en faisant passer les rayons calorifiques au travers de deux tourmalines parallèles, ou au travers de deux piles de mica, il a constaté qu'ils se polarisent par réfraction. Il a trouvé de plus que l'angle de polarisation (625) est sensiblement le même pour la chaleur que pour la lumière.

Plus tard, Foucault et M. Fizeau ont fait voir que les rayons calorifiques obscurs peuvent interférer; de son côté, M. Dessains a constaté la rotation du plan de polarisation des mêmes rayons lorsqu'ils traversent le quartz, et enfin, récemment, il a reproduit avec eux le phénomène des réseaux. Toutes ces expériences font voir l'analogie complète qui existe entre les rayons calorifiques et les rayons lumineux, et conduisent à admettre que les phénomènes de la chaleur et de la lumière sont le résultat de mouvements semblables dans la matière pondérable et dans l'éther.

LIVRE VIII

MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES AIMANTS

643. **Aimants naturels et aimants artificiels.** — On nomme *aimants* des substances qui ont la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux, qui sont le nickel, le cobalt et le chrome. Toutefois nous citerons bientôt des expériences qui prouvent que les aimants agissent réellement sur tous les corps, tantôt par attraction, tantôt par répulsion, mais d'une manière très-faible (652).

On distingue des aimants naturels et des aimants artificiels. L'*aimant naturel*, ou *pierre d'aimant*, est un oxyde de fer, connu en chimie sous le nom d'*oxyde magnétique*. Sa formule est $Fe^3O^4 = FeO + Fe^2O^3$; c'est-à-dire qu'il est formé d'un équivalent de protoxyde et d'un équivalent de sesquioxyde. L'oxyde magnétique est très-abondant dans la nature; on le rencontre dans les terrains anciens, et surtout en Suède et en Norwége, où on l'exploite comme minerai de fer, et où il donne la meilleure qualité de fer connue. Toutefois la plupart des échantillons d'oxyde de fer magnétique n'attirent pas le fer; ce n'est qu'accidentellement qu'ils sont doués de cette propriété.

Les *aimants artificiels* sont des barreaux ou des aiguilles d'acier trempé, qui ne possèdent pas naturellement les propriétés des aimants naturels, mais qui les ont acquises par des frictions avec un aimant, ou par des procédés électriques qui seront décrits plus tard. On construit aussi, sous l'influence des courants électriques, des aimants artificiels puissants avec du fer *doux*, c'est-à-dire sensiblement exempt de toute matière étrangère; mais leur aimantation, purement temporaire, ne persiste que pendant la durée du courant qui la produit.

Les propriétés des aimants artificiels et des aimants naturels sont identiquement les mêmes.

Le pouvoir attractif des aimants s'exerce à toutes les distances et à travers tous les corps; il décroît très-vite quand la distance augmente (669), et varie avec la température. Coulomb a fait voir que l'intensité magnétique d'un barreau diminue à mesure qu'on

sa température, et reprend sa valeur première quand il re-
à la température primitive, pourvu qu'on n'ait pas dépassé
certaine limite; car, à la température rouge, les aimants
ent complétement leur puissance attractive.
attraction que l'aimant exerce sur le fer est réciproque, ce
est un principe général de toutes les attractions. On le vérifie
résentant une masse de fer à un aimant : celui-ci est attiré.
force attractive des aimants a reçu le nom de *force magné-*
e, et leur théorie physique se désigne elle-même sous le nom
magnétisme, expression qu'on ne doit pas confondre avec
de *magnétisme animal*, qu'on a adoptée pour exprimer l'in-
ce qu'une personne exercerait sur une autre par l'empire de
olonté, influence qui est loin d'être démontrée.

14. Pôles et ligne neutre. — Les aimants ne possèdent pas dans
leurs points la même force magnétique. En effet, si l'on roule

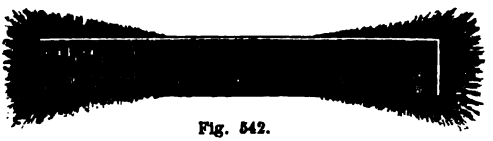


Fig. 542.

barreau aimanté dans de la limaille de fer, on voit celle-ci
rer abondamment vers les extrémités du barreau sous la forme
touppes hérissées (fig. 542); mais l'adhérence de la limaille
oit rapidement à mesure qu'on s'éloigne des extrémités, jus-
la région moyenne du barreau, où elle est nulle. La partie de
rface de l'aimant où la force magnétique est insensible a reçu
om de *ligne neutre*, et les deux points voisins des extrémités,
e manifeste le maximum d'attraction, se nomment *pôles*. Tout
nt, naturel ou artificiel, présente deux pôles et une ligne
re; toutefois, dans l'aimantation des barreaux et des ai-
les, il se produit parfois des alternatives de pôles contraires
s entre les pôles extrêmes. Ces pôles intermédiaires se
ment *points conséquents*. Tantôt ils sont en nombre pair,
t en nombre impair. Nous supposerons toujours que les ai-
s n'ont que deux pôles, ce qui est le cas ordinaire.

s pôles se désignent, l'un sous le nom de *pôle austral*, l'autre
celui de *pôle boréal*, expressions empruntées à l'action que
ôles terrestres exercent sur les pôles des aimants (653). Dans
essins, le pôle austral sera toujours représenté par les lettres
A, le pôle boréal par les lettres *b* ou B, et l'on
de *même nom* ceux représentés par les mêmes

645. **Actions mutuelles des pôles.**— Les deux pôles d'un aimant paraissent identiques quand on les présente à de la limaille de fer; mais cette identité n'est qu'apparente. En effet, qu'on suspende une aiguille aimantée *ab* (fig. 543) à un fil fin, et qu'on approche du pôle austral *a* le pôle austral A d'une autre aiguille, on remarque une vive répulsion; qu'on approche, au contraire, le pôle A du pôle boréal de l'aiguille mobile, il se produit une forte attraction. Donc les pôles *a* et *b* ne sont pas identiques, puisque l'un est repoussé et l'autre attiré par le même pôle A de l'aimant qu'on tient à la main. On vérifie de même que les deux pôles de ce dernier diffèrent entre eux, en les présentant successivement au même pôle *a* de l'aiguille mobile. Avec l'un, il y a répulsion, et attraction avec l'autre. On peut donc poser cette loi simple sur les actions réciproques entre deux aimants:

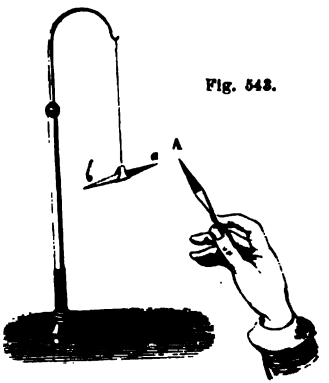


Fig. 543.

Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de noms contraires s'attirent.

Les actions contraires du pôle boréal et du pôle austral se démontrent encore par l'expérience suivante. On fait porter à un barreau aimanté un objet de fer, une clef par exemple; puis sur ce

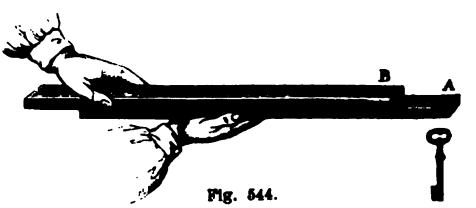


Fig. 544.

premier barreau on en fait glisser un second sensiblement de même force, en ayant soin de mettre en regard les pôles contraires (fig. 544). La clef continue à être portée, tant que les deux pôles sont éloignés; mais aussitôt qu'ils sont suffisamment rapprochés, elle tombe, comme si le barreau qui la soutenait avait perdu tout à coup sa propriété magnétique; cependant il n'en est rien, car celui-ci [illegible] porter de nouveau aussitôt qu'on a retiré le second barreau.

646. Hypothèse de deux fluides magnétiques. — Pour expliquer s phénomènes qu'on vient de faire connaître, on a longtemps lmis l'hypothèse de deux *fluides magnétiques*, agissant chacun ır répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre ; et on dégnait ces fluides sous les noms, l'un de *fluide austral*, l'autre ı *fluide boréal*, du nom des pôles des aimants où leurs actions nt prépondérantes.

Dans cette hypothèse, les deux fluides, avant l'aimantation, sont unis autour des molécules des substances magnétiques (648), et neutralisent mutuellement ; mais, sous l'influence d'une force us grande que leur attraction réciproque, ils sont séparés et ientés autour des molécules, le fluide boréal dans une direction, fluide austral dans la direction opposée, et il y a alors aimantaon, laquelle persiste tant que dure l'orientation, et cesse avec elle.

Ampère a donné sur le magnétisme une hypothèse, fondée sur s propriétés des courants électriques, plus simple et plus satisisante que la précédente. Aujourd'hui qu'on renonce de toute ırt à l'ancienne hypothèse des fluides impondérables, il convient adopter exclusivement la théorie suivante due à Ampère.

647. Théorie d'Ampère sur le magnétisme. — Il sera démontré, ms l'électro-dynamique (822), que *deux courants électriques rallèles et de même direction s'attirent*, et que *deux courants rallèles de directions contraires se repoussent.*

Se fondant sur cette action mutuelle des courants, Ampère a ;pliqué les attractions et les répulsions magnétiques en admetnt, autour des molécules des substances magnétiques, des couants particulaires de directions indéterminées les uns par rapport ıx autres avant l'aimantation, mais tous de même sens dans les mants. Or on verra (840) que tous ces courants, connus sous le ɔm de *courants d'Ampère*, équivalent à une suite de courants rallèles et de même sens, enroulés d'un pôle à l'autre à la surce de chaque aimant ; par suite, lorsqu'on met en présence les les de deux aimants, ce sont ces courants qui, suivant qu'ils nt de même sens ou de sens contraires dans ces pôles, donnent eu aux attractions et aux répulsions magnétiques.

Cette hypothèse, qui relie le magnétisme à l'électricité, satisit à l'explication de tous les phénomènes magnétiques.

648. Différence entre les substances magnétiques et les aimants. — On nomme *substances magnétiques* les substances qui sont tirées par l'aimant, comme le fer, l'acier, le nickel. Elles conanent les courants d'Ampère, mais dirigés confusément autour s molécules. Les composés ferrugineux sont généralement maétiques, et le sont d'autant plus, qu'ils contienn

Quelques-uns cependant, comme le persulfure de fer, ne sont pas attirés par l'aimant.

Il est facile de distinguer une substance magnétique d'un aimant : la première n'a pas de pôles ; présentée successivement aux deux extrémités d'une aiguille mobile *ab* (fig. 543), elle les attire toutes les deux, tandis qu'un aimant attirerait l'une et repousserait l'autre, si l'on avait soin de le présenter par le même pôle.

649. **Aimantation par influence.** — Lorsqu'une substance magnétique est mise en contact avec un barreau aimanté, les courants

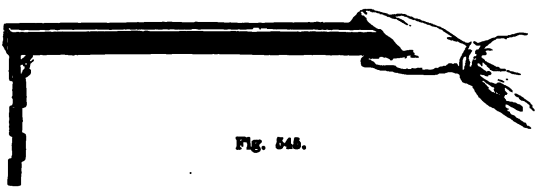


Fig. 545.

d'Ampère s'orientent tous de même sens, et la substance devient, tant que l'orientation persiste, un aimant complet, ayant ses deux pôles et sa ligne neutre. Par exemple, si l'on fait porter par l'un des pôles d'un aimant un petit cylindre de fer doux *ab* (fig. 545), ce cylindre peut, à son tour, porter un second cylindre semblable, puis celui-ci un troisième, et ainsi de suite, jusqu'à sept ou huit, suivant la force du barreau. Chacun des cylindres est donc un aimant ; mais seulement tant que continue l'influence du barreau aimanté. Car si l'on interrompt le contact de celui-ci avec le premier cylindre, aussitôt les autres cylindres se détachent et ne conservent aucune trace de magnétisme. L'orientation des courants d'Ampère n'a donc été que momentanée. Le nickel s'aimante aussi très-bien sous l'influence d'un fort aimant.

L'aimantation par influence explique la formation des houppes de limaille qui s'attachent aux pôles des aimants (fig. 542). Les parcelles en contact avec l'aimant agissent par influence sur les parcelles voisines, celles-ci sur les suivantes, et ainsi de suite ; ce qui donne naissance à la disposition filamenteuse de la limaille.

650. **Force coercitive.** — On nomme *force coercitive* la force plus ou moins intense qui, dans une substance magnétique, s'oppose à l'orientation des courants d'Ampère, ou, quand ils ont été orientés, à leur retour à leur direction primitive. D'après l'expérience ci-dessus, cette force est nulle dans le fer doux, puisque ce métal s'aimante instantanément par l'influence d'un aimant. Dans l'acier trempé, cette force est grande, et l'est d'autant plus, que la trempe est plus forte. En effet, mis en contact avec un ai-

rreau d'acier ne s'aimante que lentement; il est même le le frictionner avec l'un des pôles de l'aimant, si l'on e acquérir toute sa force. L'orientation des courants rouve donc ici une résistance qui ne se rencontre pas loux. Il en est de même de leur retour à leur première ar un barreau d'acier, une fois aimanté, ne perd que t ses propriétés magnétiques. On verra bientôt que ion, la pression ou la torsion, le fer doux peut acqué- e coercitive, mais peu durable.

rience des aimants brisés. — La présence des courants ans toutes les parties d'un aimant se démontre par suivante. On prend une aiguille à tricoter d'acier; on opérant des frictions avec le pôle d'un aimant, puis, até l'existence des deux pôles et de la ligne neutre en 'aiguille dans de la limaille de fer, on la casse en son it-à-dire dans la direction de sa ligne neutre. Or, en successivement les deux moitiés aux pôles d'une ai- le (fig. 543), on remarque qu'au lieu de ne contenir elles ont chacune deux pôles contraires et une ligne 'on brise de même ces nouveaux aimants en deux par- ive encore que chacune d'elles est un aimant complet; suite aussi loin qu'on peut continuer la division.

n des aimants sur tous les corps; corps diamagnétiques. , en 1802, observa que les aimants agissent sur tous des degrés plus ou moins marqués; phénomène qu'il faisant osciller de petits barreaux de différentes sub- e les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, l'influence de tout aimant, et en comparant les nom- llations exécutés, dans les deux cas, en des temps attribua d'abord ce phénomène à la présence de ma- gineuses dans les corps soumis à l'expérience; mais 'araday et MM. Becquerel ont démontré que les ai- ent réellement une action sur tous les corps, même sur a constaté de plus que cette action est tantôt attractive ulsive : les corps attirés ont reçu le nom de *corps ma-* et ceux qui sont repoussés celui de *corps diamagné-* mi ces derniers sont le bismuth, le plomb, le soufre, u, etc. Le cuivre est tantôt magnétique, tantôt diama- e qui tient probablement à son degré de pureté.

en 1847, avait reconnu que les aimants puissants r les flammes une action répulsive qu'il a attribuée à nce de diamagnétisme entre les gaz. De qui a fait d'importants travaux sur cette

connu que, de tous les gaz, c'est l'oxygène qui a la plus grande puissance magnétique, et qu'un mètre cube de ce gaz condensé agirait sur une aiguille aimantée comme 5gr,5 de fer.

Quelques physiciens ont regardé le diamagnétisme comme distinct du magnétisme. M. Ed. Becquerel lie entre eux les phénomènes de magnétisme et de diamagnétisme en admettant qu'il n'y a pas deux genres d'actions entre les corps et les aimants, mais seulement une aimantation par influence, et que la répulsion exercée sur certaines substances est due à ce que celles-ci sont entourées d'un milieu plus magnétique qu'elles.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME TERRESTRE, BOUSSOLES

653. **Action directrice de la terre sur les aimants.** — Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée à un fil, comme le représente la figure 543, ou lorsqu'on la pose sur un pivot autour duquel elle peut librement tourner (fig. 546), on observe que l'aiguille, au lieu de s'arrêter dans une position quelconque, finit toujours par se fixer dans une direction qui est, plus ou moins, celle du nord au sud. La même chose a lieu si, dans un vase plein d'eau, on pose un disque de liége, et sur celui-ci un barreau aimanté; le liége oscille d'abord, et lorsqu'il s'arrête la ligne droite qui joint les deux pôles de l'aimant est encore plus ou moins dans la direction du nord au sud. Mais il est à observer que, dans cette expérience, le liége et le barreau n'avancent ni vers le nord ni vers le sud. La force qui agit ici sur les aimants n'est donc pas attractive, mais seulement directrice.

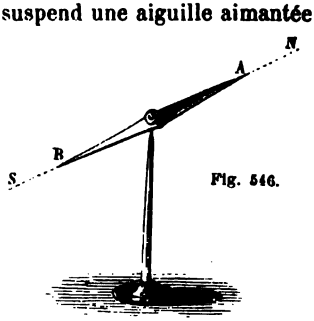


Fig. 546.

Des observations analogues ayant été faites sur tous les points du globe, on a assimilé la terre à un immense aimant dont les pôles seraient voisins des pôles terrestres, et dont la ligne neutre coïnciderait sensiblement avec l'équateur. Dans cette supposition, la terre agissant sur les aiguilles comme le ferait un aimant, les pôles de même nom se repoussent, et ceux de noms contraires

ttirent (645). C'est pourquoi, quand une aiguille aimantée se e dans la direction du nord au sud, le pôle qui regarde le nord nomme *pôle austral*, et celui qui regarde le sud, *pôle boréal*. Ampère a expliqué l'action magnétique de la terre en admettant a surface l'existence de courants électriques dirigés de l'est à est parallèlement à l'équateur, hypothèse qui fait de la terre véritable aimant (842).

554. Couple magnétique terrestre. — L'action magnétique de la re sur une aiguille aimantée peut être comparée à un *couple*, st-à-dire à un système de deux forces égales, parallèles et de rections contraires, appliquées aux deux extrémités de l'aiille. En effet, soit une aiguille *ab* mobile sur un pivot, et faiant un angle plus ou moins grand avec le méridien magnétique M' (fig. 547). Le pôle boréal de la terre agissant par attraction r le pôle austral *a*, et par répulsion sur le pôle boréal *b*, il en ulte deux forces contraires *an* et *bs*, parallèles au méridien gnétique, et égales; car le pôle terrestre est assez éloigné, et iguille assez petite, pour qu'on puisse admettre que les direcns *an* et *bs* sont parallèles, et que les pôles *a* et *b* de l'aiguille

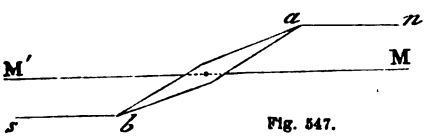


Fig. 547.

nt également distants du pôle boréal de la terre. Le pôle ausl de celle-ci agissant de la même manière sur l'aiguille, il en ulte deux autres forces, encore égales entre elles et parallèles méridien magnétique, l'une attractive dirigée suivant *bs*, re répulsive agissant suivant *an*. Or les deux forces appliies en *a* s'ajoutent pour donner une résultante égale à leur me; et comme il en est de même des deux forces appliquées b, finalement l'aiguille est soumise à l'action de deux forces ies, parallèles et contraires, tendant à la faire tourner dans le me sens. Ce sont ces forces qui constituent le *couple magnéie terrestre;* et c'est ce couple qui fait tourner l'aiguille jusà ce qu'elle s'arrête dans le méridien magnétique, position où forces appliquées en *a* et *b* se font équilibre.

555. Méridien magnétique, déclinaison. — On sait que le *méri*n *astronomique* d'un point de la surface du globe est le plan passe par ce point et par les deux pôles terrestres, et [illegible] *ridienne* est la trace de ce plan sur la surface du glo me, on appelle *méridien magnétique* d'un lieu donné

aimantée, très-variable d'un lieu à un autre, est occid
Europe et en Afrique, orientale en Asie et dans les deu
ques. De plus, dans un même lieu, elle présente de no
variations : les unes, qu'on peut considérer comme ré
sont séculaires, annuelles ou diurnes ; les autres, qui s
gulières, se désignent sous le nom de *perturbations*.

Variations séculaires. — Pour un même lieu, la dé
varie avec le temps, et l'aiguille paraît faire, à l'est et à l
méridien astronomique, des oscillations dont la durée e
sieurs siècles. On connaît la déclinaison, à Paris, dep
Le tableau suivant représente les variations qu'elle a s

Années.	Déclinaison.	Années.	Décli
1580	11° 30′ à l'est.	1825	22° 22′ à l'
1663	0	1835	22 4
1700	8 10 à l'ouest.	1850	20 21
1780	19 25 —	1855	19 57
1785	22 00 —	1860	19 32
1814	22 34 —	1864 (21 octob.)	18 57

Ce tableau montre que, depuis 1580, la déclinaison a
Paris, de plus de 34 degrés, et que le maximum de dévia
dentale a eu lieu en 1814; depuis, l'aiguille revient vers

Variations annuelles.— Les variations annuelles ont é
lées par Cassini, qui a observé, en 1784, que, de
printemps au solstice d'été, l'aiguille, à Paris, rét
l'est, et qu'au contraire elle avançait vers l'ouest

puis le lever du soleil jusque vers une heure après midi. Elle tourne ensuite vers l'est par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre, à très-peu près, vers dix heures du soir, la position qu'elle occupait le matin. La nuit, l'aiguille ne présente que peu de variations, mais subit cependant de nouveau un très-sensible déplacement vers l'ouest.

A Paris, l'amplitude moyenne de la variation diurne est, pour avril, mai, juin, juillet, août et septembre, de 13 à 15 minutes, et pour les autres mois, de 8 à 10 minutes. Il y a des jours où elle s'élève à 25 minutes, et d'autres où elle ne dépasse pas 5 minutes. Le maximum de déviation n'a pas lieu partout à la même heure. L'amplitude des variations diurnes décroît des pôles vers l'équateur, où elle est très-faible. Près de l'équateur, il existe une zone sans variation diurne.

Variations accidentelles, ou perturbations. — La déclinaison de l'aiguille aimantée est troublée dans ses variations diurnes par plusieurs causes, telles que les aurores boréales, les éruptions volcaniques, la chute de la foudre. L'effet des aurores boréales se fait sentir à de grandes distances. Des aurores qui ne sont visibles que dans le nord de l'Europe, agissent encore sur l'aiguille, à Paris, où l'on a observé des variations accidentelles de 20 minutes. Dans les régions polaires, l'aiguille oscille quelquefois de plusieurs degrés. Sa marche, irrégulière pendant toute la journée qui précède l'aurore boréale, sert de présage au phénomène.

657. Boussole de déclinaison.— La *boussole de déclinaison* est un instrument qui sert à mesurer la déclinaison magnétique en un lieu, quand on connaît le méridien astronomique de ce lieu. Elle se compose d'une boîte de cuivre rouge AB (fig. 548), dont le fond est muni d'un cercle gradué M. Au centre est un pivot sur lequel repose une aiguille aimantée *ab*, en forme de losange allongé, et très-légère. A la boîte sont appliqués deux montants qui supportent l'axe horizontal X, sur lequel est fixée une lunette astronomique L, mobile dans un plan vertical. La boîte AB est soutenue par le pied P sur lequel elle tourne librement dans le sens horizontal, entraînant la lunette dans son mouvement. Un cercle fixe QR, qui on nomme *cercle azimutal*, sert à mesurer le nombre de degrés dont la lunette a tourné, au moyen d'un vernier V fixé à la boîte. Enfin, l'inclinaison de la lunette, par rapport à l'horizon, se mesure par un vernier K, qui reçoit son mouvement de l'axe de la lunette, et se déplace sur un arc de cercle gradué et fixe *x*.

Le méridien astronomique d'un lieu étant connu, pour déterminer la déclinaison en ce lieu, on commence par disposer la boussole bien horizontalement, au moyen de vis calantes S.S, et d'un

niveau n, puis on fait tourner la boîte AB jusqu'à ce que la lunette se trouve dans le plan du méridien astronomique. Lisant alors, sur le limbe gradué M, l'angle que fait l'aiguille aimantée avec le diamètre N, qui correspond au zéro de la graduation et se trouve exactement dans le plan de la lunette, on a la déclinaison,

Fig. 348.

laquelle est occidentale ou orientale, selon que le pôle n de l'aiguille s'arrête à l'occident ou à l'orient du diamètre N.

Si le méridien astronomique du lieu n'est pas connu, on peut le déterminer à l'aide de la boussole même. Pour cela, on fait usage du cercle azimutal QR et de l'arc de cercle x, et observant avec la lunette un astre connu, avant et après son passage au méridien, on emploie la *méthode des hauteurs égales*, décrite dans les traités de cosmographie pour déterminer la méridienne.

658. **Méthode du retournement.** — Les indications de la boussole de déclinaison ne sont exactes qu'autant que l'axe magnétique de l'aiguille, c'est-à-dire la droite qui passe par ses deux pôles, coïncide avec l'axe de figure, c'est-à-dire avec la droite qui joint ses deux extrémités. En général, cette condition n'est pas satis-

le. On corrige cette cause d'erreur par la méthode du retournement. Pour cela, l'aiguille n'est pas fixée à sa chape, mais lui est ulement superposée, afin qu'on puisse l'enlever et, après l'avoir ournée, la remettre en place. La moyenne entre la déclinaison e marque alors l'aiguille et celle qu'elle marquait d'abord est déclinaison exacte. En effet, le diamètre NS étant orienté suiat le méridien astronomique, soient *ab* la direction de l'axe de are de l'aiguille, et *mn* celle de son axe magnétique (fig. 549). véritable déclinaison n'est pas mesurée par l'arc N*a*, mais par

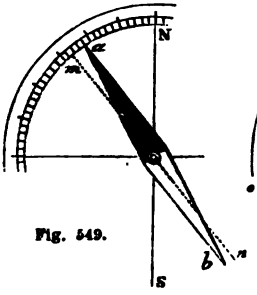


Fig. 549.

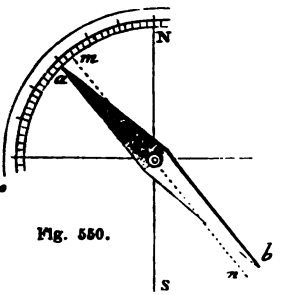


Fig. 550.

arc N*m*, qui est plus grand. Si actuellement on retourne l'aiaille, la ligne *mn* fait toujours le même angle avec le méridien S; mais l'extrémité nord de l'aiguille, qui était à droite de *mn*, ase à gauche (fig. 550), en sorte que la déclinaison, qui était op petite d'une certaine quantité, devient trop grande précisément de la même quantité. La déclinaison vraie est donc la oyenne entre les deux déclinaisons observées.

559. Boussole marine. — L'action directrice de la terre sur l'aiille aimantée a reçu une importante application dans la *boussole rine*, connue aussi sous les noms de *compas de variation* et de *mpas de mer*. C'est une boussole de déclinaison destinée à diser la marche des navires sur mer. La figure 551 en donne une e d'ensemble, et la figure 552 une coupe verticale. Elle consiste ne boîte cylindrique de laiton BB' supportée, à l'aide de deux ts rectangulaires, par la double suspension de Cardan, déjà déle en parlant du baromètre (fig. 110). La boussole, qui est lestée t partie inférieure avec une masse de plomb, conserve ainsi la ition horizontale malgré le roulis et le tangage du navire.

Au fond de la boîte est un pivot sur lequel est posé, au moyen ne chape, un barreau aimanté *ab* (fig. 552), qui est l'aiguille la boussole. Sur ce barreau est fixé un disque de mica, d'un mètre un peu plus grand que la longueur du barreau, et sur

le mica est collé un disque de papier O, sur lequel est tracée une étoile ou *rose* à 32 branches, marquant les 8 rumbs de vents, les demi-rumbs et les quarts. La branche terminée par une petite

Fig. 551.

étoile et désignée par N correspond au barreau *ab* qui est sous le disque, et marque le méridien magnétique.

La boussole est placée à l'arrière des vaisseaux dans l'*habitacle*. Pour l'appliquer à diriger un navire, on cherche d'abord, sur une

Fig. 552.

carte marine, suivant quel rumb de vent le vaisseau doit être dirigé pour se rendre à sa destination. Alors, l'œil fixé sur la boussole, le timonier tourne la barre du gouvernail jusqu'à ce que le rumb déterminé, marqué sur la rose, vienne coïncider avec une *ligne de foi*, passant par un trait *d* marqué sur la paroi intérieure de la boîte BB', et dirigé dans le sens de la quille du vaisseau. Toutefois les variations qu'éprouve la déclinaison sur les différents points du globe obligent les navigateurs à corriger continuellement les observations qu'ils font avec la boussole.

On ne connaît point l'inventeur de la boussole, ni l'époque précise de son invention. Guyot de Provins, poëte français du XIIe siècle, parle, le premier, de l'usage de l'aimant pour la navigation. Les anciens navigateurs, qui ne connaissaient pas la boussole,

nt pour guide que le soleil ou l'étoile polaire; aussi étaient-
gés de naviguer constamment en vue des côtes.

Inclinaison, équateur magnétique. — D'après la direction
nord qu'affecte la boussole de déclinaison, on pourrait
que la force qui la sollicite vient d'un point de l'horizon.
n'en est pas ainsi; car si l'on dispose l'aiguille de manière
puisse se mouvoir librement dans un plan vertical, autour
e horizontal, on observe que, quoique le centre de gravité
guille coïncide exactement avec l'axe de suspension, son
stral, dans notre hémisphère, incline constamment vers
boréal de la terre. Dans l'autre hémisphère, c'est le pôle
de l'aiguille qui incline vers le pôle austral du globe.

nd le plan vertical dans lequel se meut l'aiguille coïncide
méridien magnétique, on nomme *inclinaison* l'angle
fait avec l'horizon. Dans un autre plan que le méridien
ique, l'inclinaison augmente, et elle est de 90 degrés dans
perpendiculaire au méridien magnétique. En effet, l'action
ique de la terre se décomposant alors en deux forces, l'une
le, l'autre horizontale, la première fait prendre à l'aiguille
tion verticale, tandis que la seconde, agissant dans la di-
de l'axe de suspension, est détruite.

linaison, de même que la déclinaison, varie d'un lieu à un
nais suivant une loi mieux déterminée. On observe, en effet,
pôle boréal de la terre, des points où l'inclinaison est de
és; puis, à partir de là, elle décroît avec la latitude jusqu'à
eur, où elle est nulle, tantôt sur ce cercle même, tantôt en
nts qui en sont peu distants. Dans l'hémisphère austral
aison reparaît, mais en sens contraire; car c'est le pôle
de l'aiguille qui s'abaisse au-dessous de l'horizon.

omme *équateur magnétique* la courbe qui passe par tous
nts où l'inclinaison est nulle, et *pôles magnétiques* les
où l'inclinaison est de 90 degrés. D'après les observations
erney, l'équateur magnétique coupe l'équateur terrestre en
oints presque diamétralement opposés, l'un dans le grand
l'autre dans l'océan Atlantique. Ces points paraissent ani-
m mouvement de translation d'orient en occident. Quant
es magnétiques, il en existe deux, l'un dans l'hémisphère
près de l'île Melvil, par 74° 27′ de latitude N.; l'autre dans
phère austral, sur la terre Victoria, à l'ouest du volcan
, par environ 77° de latitude S.

linaison varie aussi dans un même lieu, d'une époque à
re. En 1671, elle était, à Paris, de 75 degrés. Depuis elle
ors été en décroissant; d'après les observations faites à

l'Observatoire, la diminution annuelle de l'inclinaison est sensiblement de 3 minutes.

661. **Boussole d'inclinaison.** — On nomme *boussole d'inclinaison* un instrument qui sert à mesurer l'inclinaison magnétique. Cette boussole, toute de cuivre, se compose d'abord d'un cercle

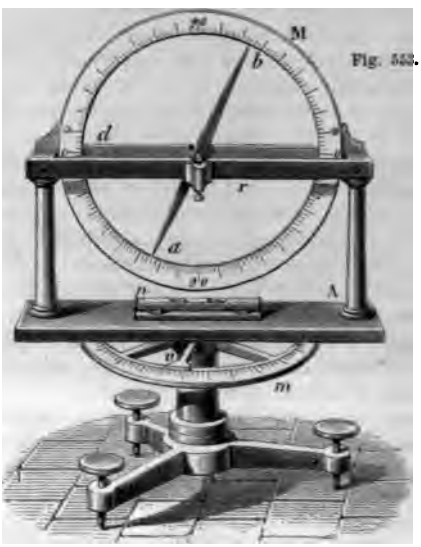


Fig. 553.

horizontal *m*, gradué et porté sur trois vis calantes (fig. 553). Au-dessus de ce cercle est un plateau A, mobile autour d'un axe vertical, et portant, à l'aide de deux colonnes, un second cercle gradué M, qui mesure l'inclinaison ; un châssis *r* soutient l'aiguille *ab*, et un niveau *n* sert, au moyen des trois vis calantes, à placer horizontalement le diamètre qui passe par les deux zéros du cercle M.

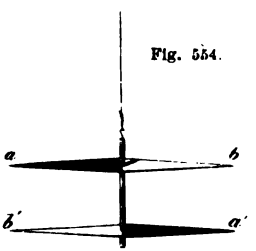
Pour observer l'inclinaison, on commence par déterminer le méridien magnétique, ce qui se fait en tournant le plateau A sur le cercle *m* jusqu'à ce que l'aiguille devienne verticale, position qu'elle prend lorsqu'elle est dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique (660). Tournant ensuite le plateau A de 90° sur le cercle *m*, on amène le cercle vertical M dans le méridien magnétique. L'angle *dca* que fait alors l'aiguille *ab* avec le diamètre horizontal, est l'angle d'inclinaison.

Toutefois il y a ici deux causes d'erreur dont il importe de tenir compte. 1° L'axe magnétique de l'aiguille peut ne pas coïncider

ec son axe de figure ; de là une erreur qu'on corrige par la mé-
de du retournement, de même que pour la boussole de décli-
son (658). 2° Le centre de gravité de l'aiguille peut ne pas coïn-
er avec l'axe de suspension, et alors l'angle *dca* est trop petit
rop grand, selon que le centre de gravité est au-dessus ou au-
ous du centre de suspension ; car, dans le premier cas, l'action
la pesanteur est contraire à celle du magnétisme terrestre pour
incliner l'aiguille, tandis que dans le second elle est de même
. On corrige cette erreur en renversant les pôles de l'aiguille ;
qui s'obtient en faisant des frictions avec les pôles contraires
eux barreaux, de manière que chaque pôle de l'aiguille soit
té par un pôle de même nom que lui. La direction de l'aiguille
ngeant alors de sens, si son centre de gravité était au-dessus
point de suspension, il est actuellement au-dessous, et l'angle
clinaison, qui était trop petit, devient trop grand. On aura
e sa vraie valeur en prenant la moyenne arithmétique entre
résultats obtenus dans les quatre observations.

. Aiguille et système astatiques. — On nomme *aiguille asta-*
e celle qui est soustraite à l'action magnétique de la terre.
le serait une aiguille mobile autour
n axe situé dans le plan du méridien
gnétique, parallèlement à l'inclinai-
n ; car le couple magnétique terres-
, agissant alors suivant l'axe, ne
ut imprimer à l'aiguille aucune di-
ion déterminée.

Fig. 554.



n *système astatique* est la réunion
eux aiguilles de même force, ré-
parallèlement, les pôles contraires
gard, comme le montre la figure
si les deux aiguilles sont rigoureusement de même force,
tions contraires du globe sur les pôles *a'* et *b*, ainsi que sur
pôles *a* et *b'*, se détruisent, et le système est complétement
tique. On verra, dans le galvanomètre, une application im-
nte du système magnétique astatique.

CHAPITRE III

AIMANTATION, LOI DES ACTIONS MAGNÉTIQUES

. Sources d'aimantation, saturation, intensité. — Les diverses
rces d'aimantation sont les aimants puissants, le magnétisme

terrestre et l'électricité. Nous ne ferons connaître que plus tard cette dernière source d'aimantation ; quant à l'aimantation par les aimants, elle s'opère par trois méthodes : celle de la simple touche, celle de la touche séparée et celle de la double touche.

Quelle que soit celle de ces trois méthodes dont on se sert pour aimanter un barreau d'acier, il y a une limite à la puissance magnétique que celui-ci peut acquérir, limite qui dépend de son degré de trempe et de la force des aimants qui servent à l'aimantation. On exprime que cette limite est atteinte en disant que le barreau est aimanté *à saturation*. Lorsque le point de saturation a été dépassé, le barreau y revient bientôt, et tend même à descendre au-dessous, si l'on n'entretient pas sa force magnétique à l'aide d'armures, comme on le verra ci-après (668).

L'expérience a appris qu'un aimant étant aimanté à saturation, *sa force est proportionnelle à la racine cubique du carré du poids*. Cette loi est connue sous le nom de *loi de Haecker*, elle avait été trouvée par Daniel Bernouilli dès 1758.

664. **Méthode de la simple touche.** — Cette méthode consiste à faire glisser le pôle d'un fort aimant d'un bout à l'autre du barreau qu'on veut aimanter, et à répéter plusieurs fois les frictions, toujours dans le même sens. Les courants d'Ampère (647) sont alors orientés successivement dans toute la longueur du barreau, et la dernière extrémité que touche l'aimant mobile présente un pôle contraire à celui avec lequel on a fait les frictions. Ce procédé n'a qu'une faible puissance d'aimantation, d'où il résulte qu'il ne peut être appliqué qu'à de petits barreaux ; de plus, il développe fréquemment des points conséquents (644).

665. **Méthode de la touche séparée.** — La méthode de la touche séparée, adoptée par Knight, en Angleterre, en 1745, consiste à placer les deux pôles contraires de deux barreaux d'égale force au milieu du barreau à aimanter, et à les faire glisser simultanément chacun vers un des bouts du barreau, en les tenant verticalement. On rapporte ensuite chaque aimant vers le milieu du barreau, et l'on recommence de la même manière. Après plusieurs frictions semblables sur les deux faces, le barreau est aimanté.

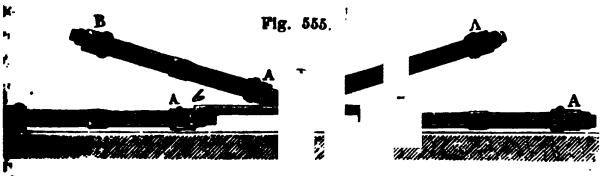
Duhamel a perfectionné cette méthode en plaçant les deux bouts du barreau à aimanter sur les pôles contraires de deux aimants fixes, dont l'action concourt avec celle des aimants mobiles qui servent à opérer les frictions, la position relative des pôles étant la même que dans la figure 555.

666. **Méthode de la double touche.** — Dans la méthode de la double touche, due à Mitchell, les deux aimants qui servent à opérer les frictions sont encore placés au milieu du barreau à aimanter,

s pôles contraires en regard; mais, au lieu de glisser en sens traires vers ses extrémités, ils sont maintenus à un intervalle au moyen d'une petite pièce de bois placée entre eux (fig. 555), lissent ensemble du milieu à une extrémité, puis de celle-ci utre extrémité, et ainsi de suite, de manière que chaque moi- du barreau reçoive le même nombre de frictions.

pinus, en 1758, perfectionna cette méthode en plaçant, comme s le procédé de la touche séparée, deux forts barreaux sous

Fig. 555.



i qu'on veut aimanter, et en inclinant les barreaux mobiles angle de 15 à 20 degrés (fig. 555). On aimante ainsi de forts eaux; mais on obtient souvent des points conséquents.

7. Aimantation par l'action de la terre. — L'action de la terre les substances magnétiques étant comparable à celle des ai- ts, le magnétisme terrestre tend constamment à orienter les ents d'Ampère dans le fer et dans l'acier. Dans ce dernier, la e coercitive étant très-grande, l'action de la terre est insuffi- te pour produire l'aimantation, du moins instantanément. Il t est plus de même sur une barre de fer doux, surtout si on la e dans le méridien magnétique parallèlement à l'inclinaison. lefois on n'a ainsi qu'une aimantation instable; car si l'on urne la barre, les pôles sont aussitôt intervertis, la force citive du fer doux étant nulle.

pendant on parvient à donner au fer doux une force coercitive fible, si, tandis qu'il est sous l'influence de la terre et dans irection indiquée ci-dessus, on le soumet à une forte torsion, i on le bat à froid sur une enclume, à coups de marteau. la force coercitive ainsi développée est faible et se perd ôt complétement, ce qui n'a pas lieu pour l'acier.

est par l'influence prolongée du magnétisme terrestre qu'on ique la formation des aimants naturels, ainsi que l'aimanta- qu'on observe fréquemment dans les vieux objets d'acier ou er; car les fers ordinaires du commerce, qui ne sont pas , possèdent une faible force coercitive : il en résulte qu'ils entent presque toujours des traces d'aimantation, ainsi que s'observe dans les clous, les pelles, les pinces, etc. La fonte e grande force coercitive et s'aimante très-bien.

668. **Faisceaux magnétiques, armure des aimants.** — Un *faisceau magnétique* est un ensemble de barreaux aimantés réunis parallèlement par leurs pôles de même nom. Tantôt on leur donne une forme de fer à cheval (fig. 556), tantôt une forme rectiligne (fig. 557). Le faisceau représenté dans la figure 556 est formé de 5 lames d'acier juxtaposées. Celui de la figure 557 se compose de 12 lames disposées en trois couches de 4 lames chacune. La forme de fer à cheval est préférable pour faire porter un poids à l'aimant, car les deux pôles sont utilisés en même temps. Dans les deux espèces de faisceaux, les lames sont trempées et aimantées séparément, puis superposées et réunies par des vis de fer, ou par des viroles de laiton.

Fig. 556.

La force d'un faisceau n'est pas égale à la somme des forces de chaque barreau, ce qui provient des actions répulsives qu'exercent les uns sur les autres les pôles voisins; on augmente la force d'un faisceau en faisant

Fig. 557 ($l=45$).

les lames latérales plus courtes de 1 à 2 centimètres que la lame du milieu (fig. 556 et 557).

On nomme *armures* des pièces de fer doux A et B (fig. 557), qu'on met en contact avec les pôles pour conserver leur magnétisme, ou même pour l'augmenter, par suite d'une action par influence.

La figure 558 représente, avec ses armures, une pierre d'aimant naturel; sur les faces qui correspondent aux pôles sont deux lames de fer doux, terminées chacune par un talon massif. Sous l'influence de l'aimant naturel, ces lames s'aimantent, et les lettres A et B représentant le lieu des pôles de l'aimant naturel, il est facile de voir que les pôles des armures le sont respectivement par

[redacted]

s *a* et *b*. Or ces armures, une fois aimantées, réagissent ur sur les courants particulaires de l'aimant naturel, les t avec plus de force et accroissent ainsi la puissance ma-. Sans armure, les aimants naturels sont très-faibles : més, ils deviennent capables de porter des poids qui aug- progressivement jusqu'à une cer- nite qu'ils ne peuvent dépasser.

rtant a'b', qui est de fer doux, fait e l'office d'une deuxième armure ; mantant par influence, ses pôles *a'* gissent sur les pôles *a* et *b* de la e.

Fig. 558.

armer les aimants artificiels, on ose par paire, comme le repré- figure 559, en plaçant en regard s contraires, puis on ferme le cir- c deux petits barreaux de fer doux x-ci s'aimantant par influence, les réagissent sur les barreaux ai- pour leur conserver leur force ma-. Quant aux aiguilles mobiles (fig. mme elles se dirigent vers les pôles ques du globe, l'influence de celui-ci leur tient lieu d'ar-

isceaux magnétiques construits jusqu'ici ne portaient tre à cinq fois leur poids. En substituant aux lames d'a- isses dont on faisait usage, des lames très-minces, ai-

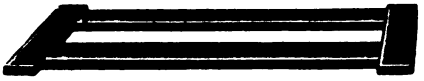


Fig. 559 ($l=45$).

à saturation, et superposées en nombre suffisant, M. Ja- nt d'obtenir des aimants qui portent onze fois leur poids ; st un progrès considérable pour les applications du ma- e.

Loi des attractions et des répulsions magnétiques. — Coulomb, r, a constaté cette loi, *que les attractions et les répulsions magné- ercent en raison inverse du carré de la distance*, et il l'a démontrée méthodes, celle de la balance de torsion et celle des oscillations.

ode de la balance de torsion. — La balance de torsion consiste en une rre (fig. 560), recouverte d'une glace qu'on enlève à volonté, et qui , près des bords, d'une ouverture destinée à introduire un aimant A. de cette même glace est une seconde ouverture à laquelle est adapté verre, qui peut tourner à frottement doux sur les bords de l'orifice.

Ce tube porte à sa partie supérieure un *micromètre*. On nomme ainsi un système de deux pièces, dont l'une *e*, qui est fixe, est divisée sur son contour en 360 degrés, et l'autre *d*, qui est mobile, porte un point de repère qui indique de combien de degrés on fait tourner cette pièce *d* sur la pièce graduée *e*. A gauche du dessin, en E et en D, sont représentées sur une plus grande échelle les deux pièces du micromètre. Au disque D sont fixés deux montants traversés par un axe horizontal sur lequel s'enroule un fil d'argent très-fin, qui soutient une aiguille aimantée *ab*. Enfin, sur une bande de papier collée sur la cage, sont tracées, à droite et à gauche du zéro *o*, des divisions qui servent à mesurer l'écart de l'aiguille *ab*, et, par suite, la torsion du fil d'argent.

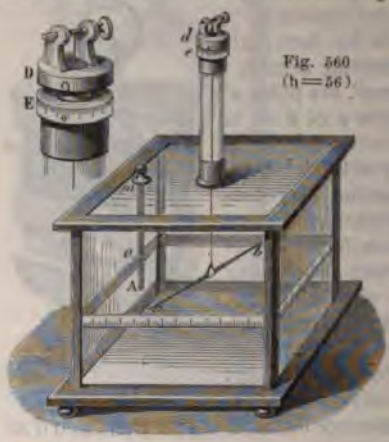


Fig. 560 (h = 56).

Le trait de repère *e* du disque D étant au zéro du cercle gradué E, on commence par orienter la cage de manière que le fil qui supporte l'aiguille *ab* et le zéro tracé sur la bande de papier se trouvent dans le méridien magnétique; retirant alors l'aiguille de sa chape, on la remplace par une aiguille semblable, de cuivre, puis on tourne le tube de verre, et avec lui les pièces *e* et *d*, jusqu'à ce que cette aiguille vienne s'arrêter au zéro de la graduation. Le fil d'argent étant alors sans torsion et le barreau aimanté A n'étant pas encore en place, on enlève l'aiguille de cuivre qui est dans la chape, et l'on y remet l'aiguille aimantée *ab*; celle-ci se trouve ainsi exactement dans le méridien magnétique, sans torsion du fil.

L'appareil ainsi disposé, il est nécessaire, avant d'introduire l'aimant A, de connaître l'action de la terre sur l'aiguille mobile *ab*, lorsque celle-ci dévie du méridien magnétique d'un certain nombre de degrés. Pour cela, on tourne la pièce D jusqu'à ce que l'aiguille *ab* se déplace de 1 degré dans le même sens. Le nombre de degrés moins un dont on a tourné le micromètre représente évidemment la torsion totale du fil. Dans les expériences de Coulomb, ce nombre était 35; mais il varie avec la longueur du fil, son diamètre et l'aimantation du barreau *ab*. Or, l'aiguille demeurant actuellement en équilibre, il est évident que la force de torsion du fil est précisément égale et contraire à l'action directrice de la terre. Donc cette action, dans les expériences de Coulomb, était représentée par 35, pour une déviation de 1 degré; mais la force de torsion étant proportionnelle à l'angle de torsion (71, 2°), et l'action de la terre une fois qu'il y a équilibre, lui étant égale, il en résulte que cette dernière devient pour des déviations de 2, 3 . . . degrés, est représentée par 2 fois, 3 fois 35.

L'action de la terre une fois déterminée, on descend dans la cage l'aimant A, en ayant soin de placer en regard les pôles de même nom. Le pôle *a* de l'aiguille mobile est repoussé, et si l'on représente par *d* le nombre de degrés qui mesure l'angle d'écart quand l'aiguille *ab* est en équilibre, cette aiguille tend à revenir vers le méridien magnétique avec une force représentée par la somme $d + 35 \times d$, le terme *d* étant dû à la torsion du fil, et le terme $35 \times d$ à l'action de la terre; puisqu'elle n'y revient pas, il faut que la force répulsive qui s'exerce entre les

pôles a et A soit elle-même égale à $d+35\times d$. Cela posé, on tourne le disque D de manière que l'angle de déviation d devienne deux fois plus petit. D'après la position de l'aiguille ab, dans la figure ci-dessus, ce serait de gauche à droite qu'il faudrait tourner. En représentant par n la rotation du disque D, on voit que le fil de suspension est tordu, à son bout supérieur, de n degrés à droite, et à son bout inférieur de $\frac{d}{2}$ degrés à gauche; sa torsion est donc $n+\frac{d}{2}$. Par conséquent la force réelle qui tend à ramener l'aiguille vers le méridien magnétique est $\left(n+\frac{d}{2}\right)+35\times\frac{d}{2}$, le binôme $n+\frac{d}{2}$ représentant la force de torsion, et le terme $35\times\frac{d}{2}$ l'action de la terre. Or, l'aiguille ne revenant pas vers le méridien, il faut que la force répulsive qui s'exerce entre les deux pôles a et A soit maintenant représentée par $\left(n+\frac{d}{2}\right)+35\times\frac{d}{2}$.

En effectuant les calculs, c'est-à-dire en remplaçant n et d par les nombres fournis par l'expérience, on trouve que la quantité $\left(n+\frac{d}{2}\right)+35\times\frac{d}{2}$ est précisément le quadruple de la quantité $d+35\times d$, obtenue dans la première expérience. La loi de Coulomb est donc démontrée, car on expérimente sur des arcs d et $\frac{d}{2}$ assez petits pour se confondre sensiblement avec leurs cordes, c'est-à-dire que lorsque l'arc devient deux fois plus petit, il en est sensiblement de même de la distance aA des pôles.

2° *Méthode des oscillations.* — Cette méthode consiste à faire osciller une aiguille aimantée pendant des temps égaux, d'abord sous l'influence seule de la terre, puis sous l'influence combinée de la terre et du pôle attractif d'un aimant placé successivement à deux distances inégales. Des trois nombres d'oscillations observés, on déduit ensuite par le calcul la loi de Coulomb.

670. **Intensité et distribution du magnétisme terrestre.** — Un grand nombre de physiciens et de navigateurs ont mesuré l'intensité magnétique du globe aux différents lieux et à différentes époques. Plusieurs méthodes ont été adoptées, qui reviennent à faire osciller une aiguille d'inclinaison ou de déclinaison pendant un temps donné, et à déduire des nombres d'oscillations les intensités relatives. On a ainsi trouvé les lois suivantes sur l'intensité du magnétisme terrestre :

1° Elle augmente à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur magnétique, et elle devrait être une fois et demie plus grande aux pôles que sur cette ligne; la ligne sans inclinaison est donc en même temps la ligne de moindre intensité.

2° Elle décroît à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, et ce décroissement suit probablement la loi du rapport inverse du carré des distances.

3° Elle varie avec les heures de la journée, et atteint son minimum entre dix et onze heures du matin, et son maximum entre quatre et cinq heures de l'après-midi.

4° Enfin, elle présente des variations irrégulières, et, comme la déclinaison et l'inclinaison, elle éprouve des perturbations accidentelles par l'influence des aurores boréales.

On nomme *lignes isodynamiques* des lignes qui, sur la surface du globe, présentent en tous leurs points la même intensité magnétique; *lignes isogones*, [illegible] tout la même déclinaison, et *lignes isoclines*, celles [illegible] rey a construit neuf courbes isodynamiques au nord [illegible] équateur magnétique, et il a trouvé que ces lignes par [illegible] section, ont une grande analogie avec les *lignes* [illegible]

LIVRE IX

ÉLECTRICITÉ A L'ÉTAT STATIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES FONDAMENTAUX

671. **Électricité, hypothèses sur sa nature.** — L'*électricité* est un agent physique puissant, dont la présence se manifeste par des attractions et des répulsions, par des apparences lumineuses, par des commotions violentes, par des décompositions chimiques et par un grand nombre d'autres phénomènes. Les causes qui développent de l'électricité sont le frottement, la pression, les actions chimiques, la chaleur, le magnétisme et l'électricité elle-même.

Thalès, 600 ans avant J.-C., avait déjà remarqué la propriété qu'a l'ambre jaune frotté d'attirer les corps légers. En parlant de cette substance, Pline dit : « Quand le frottement lui a donné la chaleur et la vie, elle attire les brins de paille, comme l'aimant attire le fer. » Mais là se bornèrent les connaissances des anciens sur l'électricité. Ce n'est qu'à la fin du XVIe siècle que Gilbert, médecin de la reine Élisabeth, à Londres, appela de nouveau l'attention des physiciens sur les propriétés de l'ambre jaune, en faisant voir que beaucoup d'autres substances peuvent aussi acquérir la propriété attractive par le frottement. L'impulsion une fois donnée, les découvertes se succédèrent aussi nombreuses que rapides. Les savants qui, depuis Gilbert, ont surtout contribué au progrès de l'électricité, sont Otto de Guericke, Dufay, Æpinus, Franklin, Coulomb, Volta, Davy, Œrsted, Ampère, Schweigger, Seebeck, Faraday, MM. de la Rive et Becquerel. C'est à ce dernier savant et à Davy qu'est due presque toute l'électro-chimie.

Malgré les nombreux travaux dont l'électricité a été l'objet, on ne connaît point la nature de cet agent; de même que pour la chaleur, la lumière et le magnétisme, les physiciens en sont réduits à des hypothèses. Newton pensait que la production de l'électricité était le résultat d'un principe éthéré mis en mouvement par les vibrations des molécules des corps. L'abbé Nollet, se fondant sur les effets lumineux et calorifiques de l'électricité, la regardait comme une modification de la chaleur et de la lumière. Nous fe-

ınaître bientôt (678) la théorie de Symmer, dans laquelle et l'existence de deux fluides électriques; celle de Franıns laquelle on n'en admet qu'un seul; et enfin, une théonte, qui est une modification de celle de Franklin.

Électricité statique et électricité dynamique. — Abstraction toute hypothèse, l'étude de l'électricité se partage en deux divisions, comprenant : l'une, les phénomènes que pré-*lectricité statique* ou en repos; l'autre, ceux que présente *cité dynamique* ou en mouvement. A l'état statique, l'élec-ı surtout pour cause le frottement; elle s'accumule alors à ce des corps et s'y maintient en équilibre à un état de *ten-*ı se manifeste par des attractions et par des étincelles. A ynamique, l'électricité résulte principalement d'actions ıes, et traverse les corps sous forme de *courants*, avec esse comparable à celle de la lumière. Elle se distingue e l'électricité statique particulièrement par des phéno-chimiques et par ses rapports avec le magnétisme.

traiterons d'abord de l'électricité statique, en considérant ticulièrement celle qui est développée par le frottement, et ons qu'un corps est *électrisé* quand il possède la propriété r les corps légers, ou de produire des effets lumineux.

Développement de l'électricité par le frottement. — Un ombre de substances, quand on les frotte avec un morceau ou avec une peau de chat, acquièrent la propriété d'attirer s légers, comme les barbes de plume, les brins de paille. ropriété se remarque surtout dans l'ambre jaune, la cire ter, la résine, la gutta-percha, le soufre, le verre, la soie, chouc durci.

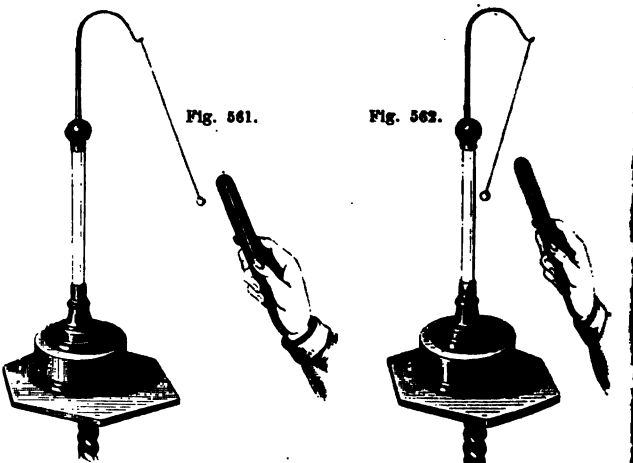
ırps solide peut aussi s'électriser par le frottement avec un ou un gaz : dans le vide barométrique, le mouvement du ı électrise le verre; un tube vide d'air, dans lequel on a é quelques globules de mercure, devient lumineux dans ité lorsqu'on agite le mercure. Quant aux gaz, Wilson avait ıu'un courant d'air dirigé sur une tourmaline, du verre, ısine, électrisait ces substances; mais Faraday a reconnu qu'il n'y a d'effet électrique qu'autant que l'air est hu-ı tient en suspension des poudres sèches.

ıttement ne paraît pas d'abord développer l'électricité sur ıs substances, particulièrement sur les métaux; car, te-ıne main une barre de métal, si on la frotte avec un mor-drap, on ne remarque aucune trace d'attraction lorsqu'on nte au pendule électrique (674). Il ne faudrait pas en con-ue les métaux ne s'électrisent point par le frottement:

c'est là, en effet, une propriété générale pour tous les corps, mais qui ne se manifeste pour beaucoup d'entre eux qu'autant qu'ils sont placés dans des conditions convenables (676).

On ignore la cause du développement de l'électricité par le frottement. Wollaston l'a attribué à une oxydation; mais Gray avait fait voir avant lui que le frottement développe de l'électricité dans le vide, et Gay-Lussac a reconnu qu'il peut aussi en développer dans l'acide carbonique sec.

674. **Pendule électrique.** — On reconnaît qu'un corps est électrisé au moyen de petits instruments qu'on nomme *électroscopes*,



et dont le plus simple est le *pendule électrique* (fig. 561). Il consiste en une petite balle de moelle de sureau suspendue, par un fil de soie, à un support à pied de verre. Lorsqu'on approche un corps électrisé, la petite balle est d'abord attirée (fig. 561), puis repoussée aussitôt qu'il y a eu contact (fig. 562).

675. **Corps conducteurs et corps non conducteurs.** — Lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de cire à cacheter frotté par un bout, on remarque qu'il n'attire que par l'extrémité qui a été frottée; celle qui ne l'a pas été ne donne aucun signe, soit d'attraction, soit de répulsion. Il en est de même avec un tube de verre, un bâton de soufre, tant qu'ils n'ont pas été frottés dans toute leur longueur. On conclut de là que, dans ces corps, la propriété électrique ne se propage pas d'une partie à l'autre; ce qu'on exprime en disant qu'ils ne *conduisent* pas l'électricité. Au contraire, l'en-

ontre qu'aussitôt qu'un corps métallique a acquis sur points la propriété électrique, instantanément elle se r toute la surface du corps, quelle que soit son étendue; ; que les métaux *conduisent* bien l'électricité.

distinction de corps *bons conducteurs* et de corps *mau-cteurs*. Les meilleurs conducteurs sont les métaux, , la plombagine, le coke, le charbon de bois bien cal-yrites, la galène; puis les dissolutions salines, dont le nducteur est plusieurs milliers de fois moindre que celui ; enfin, l'eau à l'état de vapeur et à l'état liquide, les le corps humain et tous les corps humides. Les mau-cteurs sont le soufre, la résine, la gomme laque, le , la gutta-percha, la soie, le verre, les pierres précieuses, non calciné, l'essence de térébenthine, les huiles, s; mais si ceux-ci sont humides, ils conduisent par la c laquelle ils sont mélangés. Du reste, le degré de con-des corps ne dépend pas seulement de la substance dont més, mais encore de leur température et de leur état Le verre, qui est très-mauvais conducteur à la tempé-naire, conduit lorsqu'il est chauffé au rouge. De même laque et le soufre deviennent conducteurs lorsqu'on les au, qui conduit très-bien à l'état liquide, est mauvais à l'état de glace sèche. Le verre pulvérisé et la fleur onduisent assez bien.

ps isolants, réservoir commun. — Les corps mauvais s ont reçu le nom de *corps isolants*, ou d'*isoloirs*, parce mploie comme supports lorsqu'il s'agit de conserver à nducteur son électricité. Cette condition est indispen-a terre étant formée de substances qui conduisent l'élec-sitôt qu'un corps conducteur électrisé communique avec conducteur, l'électricité s'écoule immédiatement dans n nomme, à cause de cela, le *réservoir commun*. On rps en le soutenant sur des pieds de verre, en le sus-des cordons de soie, ou en le posant sur des gâteaux Toutefois les plus mauvais conducteurs n'isolent jamais ent, d'où il résulte que tout corps électrisé perd toujours ins lentement son électricité au travers des supports s il repose; il y a, en outre, déperdition par la vapeur st dans l'air, et c'est ordinairement la plus abondante. use de leur grande conductibilité qu'on ne peut obte-icité sur les métaux par le frottement, si l'on n'a soin de t de les frotter avec un corps non conducteur. Si l'on ces conditions, les métaux s'électrisent très-bien par

le frottement. Pour le démontrer, on fixe un tube de laiton à un manche de verre (fig. 563), et, tenant ce dernier à la main, on frotte le tube métallique avec un morceau de soie ou de taffetas ciré ; en l'approchant ensuite du pendule électrique, on observe une attraction qui montre que le métal est électrisé. Si l'on tient

Fig. 563 ($l=50$).

le métal à la main, il y a bien encore production d'électricité, mais elle se perd immédiatement dans le sol.

677. **Hypothèse de deux espèces d'électricité.** — On a vu (674) que lorsqu'on présente au pendule électrique un tube de verre frotté avec un morceau de drap, il y a attraction d'abord, puis répulsion aussitôt après le contact. Les mêmes effets se produisent avec un bâton de cire à cacheter frotté de la même manière, il semble d'abord, dans ces deux expériences, que l'électricité développée sur le verre soit identique avec celle qui est développée sur la résine. Or, en poussant plus loin l'observation, on reconnaît qu'il n'en est pas ainsi. En effet, le tube de verre et le bâton de résine ayant été électrisés comme il vient d'être dit, si, tandis que le pendule électrique est repoussé par le verre, on approche la résine, celle-ci attire vivement la balle de sureau ; de même, si au pendule repoussé par la résine après qu'il l'a touchée, on présente le tube de verre, on observe une forte attraction : c'est-à-dire qu'*un corps repoussé par l'électricité du verre est attiré par l'électricité de la résine ;* et, réciproquement, *un corps repoussé par l'électricité de la résine est attiré par celle du verre.*

Se fondant sur les faits qui viennent d'être décrits, Dufay, physicien français, admit, en 1734, l'existence de deux électricités de nature différente : l'une qui se développe sur le verre quand on le frotte avec de la laine, l'autre qui se développe sur la résine ou sur la cire d'Espagne quand on les frotte avec un morceau de drap ou une peau de chat. La première a reçu le nom d'*électricité vitrée ;* la seconde, celui d'*électricité résineuse.* On va voir (679) comment on interprète aujourd'hui l'hypothèse de Dufay.

678. **Théories de Franklin et de Symmer.** — De nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer les phénomènes électriques. Deux seulement sont restées, celle de Franklin et celle de Symmer. Franklin, mort à Philadelphie, en 1790, admit, pour cause de l'électricité, un fluide unique, impondérable, agissant par répulsion sur ses propres molécules et par attraction sur celles de la matière. Tous les corps contiennent, à l'état neutre, une

terminée de ce fluide : quand elle augmente, les corps
sés *positivement*, et possèdent les propriétés de l'élec-
le; quand elle diminue, les corps sont électrisés *néga-*
t présentent les propriétés de l'électricité résineuse.
nation d'*électricité positive* équivaut donc à celle
é *vitrée*, et la dénomination d'*électricité négative* à
tricité résineuse. L'électricité positive se représente,
e + (*plus*), et l'électricité négative par le signe —
n se fondant sur ce qu'ainsi qu'en algèbre en ajoutant
z on a zéro, de même en donnant à un corps qui pos-
me certaine quantité d'électricité positive, une quan-
'électricité négative, on obtient l'état neutre.

ayant, le premier, donné une théorie complète de la
e Leyde (722) dans l'hypothèse d'un seul fluide, cette
fut d'abord généralement admise par les physiciens et
ui-même. Cependant des objections sérieuses ayant été
out par Æpinus, à l'hypothèse d'un seul fluide, Symmer,
nglais, opposa à cette théorie celle de deux fluides élec-
ssant chacun par répulsion sur lui-même et par attrac-
utre. Selon ce physicien, ces fluides existent dans tous
l'état de combinaison, formant ce qu'on nomme le
re ou *naturel*. Différentes causes, et surtout le frotte-
actions chimiques, peuvent les séparer, et c'est alors
sent les phénomènes électriques; mais ces fluides ont
tendance à se réunir pour former de nouveau du fluide
nmer donna aux deux fluides électriques les noms de
é et de *fluide résineux*, dénominations généralement
par celles de *fluide positif* et de *fluide négatif*, em-
la théorie de Franklin.

orie moderne de l'électricité. — La théorie de Symmer
à l'époque actuelle exclusivement adoptée, surtout
; non pas qu'on y eût une foi bien vive, mais elle pa-
mple et surtout on y était habitué. Aujourd'hui, la
s deux fluides électriques tombe devant le principe de
forces physiques (8), et on revient, en la modifiant, à
de Franklin.

que le physicien de Philadelphie admettait, pour cause
icité, un fluide spécial agissant par répulsion sur lui-
ar attraction sur la matière, les physiciens modernes,
ramener tous les phénomènes physiques à une cause
nsent que c'est à l'éther même qu'est due l'électricité.
sur ce que non-seulement la chaleur se transforme en
308), mais aussi en électricité, et que réciproquement

l'électricité apparaît, à l'état positif s'il y a condensation et à l'état négatif s'il y a raréfaction. Dans l'électricité (672), il y a de plus transport du fluide éthéré sous la flux à travers un conducteur.

Enfin, l'éther étant un fluide éminemment élastiqu lécules se repoussent; il ne peut donc exister seul, il matière proprement dite qui l'attire et le maintient en Attiré par les corps, l'éther doit l'être par la terre; il poids, une masse, et ne peut être impondérable co suppose ordinairement.

Cette nouvelle théorie est plus simple que celle des d « Elle a pour elle cet avantage qu'elle ramène tous mènes à une seule cause, ce qui est le but suprême d moderne. Dans cette hypothèse, il n'y a plus qu'un s l'éther; la chaleur et la lumière seraient des effets de l'électricité un effet de masse. » (M. Bertin, *Revue des c tifiques* du 15 décembre 1866.)

Les savants qui rapportent aujourd'hui à l'éther l' l'électricité se sont proposé en outre d'expliquer les at les répulsions électriques par la condensation ou la l'éther à la surface des corps. Nous ne pouvons les suiv les démonstrations qu'ils ont données à ce sujet. Il ne dissimuler d'ailleurs que la théorie des attractions et présente des difficultés peut-être insurmontables, vu pour l'attraction universelle (40). Toutefois, da

qu'ici, et de les remplacer exclusivement par celles d'*électricité positive* ou en plus, et d'*électricité négative* ou en moins. Mais qu'il soit bien entendu, une fois pour toutes, qu'on n'entend pas dire par là qu'il y a deux espèces d'électricités. Il n'en existe qu'une, se présentant sous deux états opposés : en excès, ou en moins; ce que représentent assez bien les notations *électricité* + et *électricité* —, adoptées par quelques physiciens.

Les sciences physiques se trouvent à une époque de transition, où l'on est forcé d'exprimer en vieux langage des idées nouvelles. Tout en adoptant celles-ci, nous dirons donc qu'un corps *est à l'état neutre*, quand la distribution et la tension du fluide éthéré sur ce corps sont à l'état normal, c'est-à-dire en équilibre avec l'éther ambiant; qu'un corps est *électrisé*, quand l'équilibre est rompu entre l'éther qu'il possède et l'éther ambiant; que deux corps sont *chargés de la même électricité*, lorsque l'éther est condensé sur tous les deux, ou raréfié; enfin, qu'ils sont *chargés d'électricités contraires*, toutes les fois que le fluide éthéré, condensé sur l'un, est raréfié sur l'autre.

531. Actions mutuelles entre les corps électrisés. — Les effets d'attraction et de répulsion entre les corps électrisés se résument dans le principe suivant, qui sert de base à la théorie de tous les phénomènes de l'électricité statique : *Deux corps chargés de la même électricité se repoussent, et deux corps chargés d'électricités contraires s'attirent.* En effet, si l'on communique à la boule du pendule électrique (fig. 561) de l'électricité positive par exemple, en la touchant avec un corps électrisé positivement, la boule, aussitôt électrisée, est vivement repoussée; mais si, tandis qu'elle est chargée d'électricité positive, on lui présente un corps électrisé négativement, elle est fortement attirée.

532. Loi de l'électrisation par le frottement. — Lorsqu'on frotte ensemble deux corps de nature quelconque, l'électricité neutre de chacun est décomposée, et toujours *l'un des corps s'électrise positivement, l'autre négativement.*

Pour le démontrer, on communique au pendule électrique une électricité connue, et on lui présente séparément les deux corps frottés, qui doivent être isolés dans le cas où ils sont conducteurs : par exemple, deux disques, l'un de verre poli, l'autre de métal ou de bois recouvert d'une rondelle de drap (fig. 564). Tenant ces disques par deux manches de verre isolants auxquels ils sont fixés, on les frotte vivement l'un contre l'autre et on les sépare vite brusquement. Or l'un des deux attire la balle de sureau, l'autre la repousse; ce qui montre qu'ils sont chargés d'électricités contraires. De plus, ils le sont en quantité égale, car si on

les présente au pendule tandis qu'ils sont en contact, il n'y a ni attraction ni répulsion; donc les deux électricités se font équilibre.

L'électricité développée sur un corps, par le frottement, varie avec la nature du corps frotté. Le verre poli, frotté avec de la laine, s'électrise positivement; frotté de la même manière, le verre dépoli s'électrise négativement. L'espèce d'électricité développée dépend aussi de la nature du frottoir. Les substances ci-après s'électrisent positivement lorsqu'elles sont frottées par celles qui les suivent, et négativement quand elles le sont par celles qui les précèdent : peau de chat, verre poli, laine, plume, bois, papier, soie, gomme laque, résine, verre dépoli.

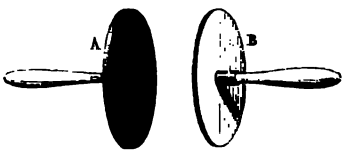


Fig. 564.

L'électricité dégagée par le frottement dépend encore du degré de poli, du sens des frictions et de la température. En effet, si l'on frotte l'un contre l'autre deux plateaux de verre inégalement polis, c'est celui dont la surface est la plus polie qui prend l'électricité positive; l'autre s'électrise négativement. Si l'on frotte en croix, l'un sur l'autre, deux rubans de soie blanche pris dans la même pièce, celui qui est frotté transversalement s'électrise négativement, l'autre positivement. Quand on frotte l'un contre l'autre deux corps de même substance, dont la surface a le même degré de poli, mais dont la température est différente, c'est la substance la plus échauffée qui prend l'électricité négative. En général, c'est le corps dont les molécules peuvent se déplacer plus facilement qui s'électrise négativement.

683. **Diverses sources d'électricité.** — Outre le frottement, les causes qui peuvent développer de l'électricité sont la pression, le clivage, les actions chimiques et la chaleur.

Æpinus, le premier, constata le développement de l'électricité par la pression; Libes, depuis, montra qu'en pressant légèrement sur un disque de bois recouvert de taffetas gommé un disque de métal isolé à l'aide d'un manche de verre, ce dernier disque s'électrise négativement. Haüy fit voir ensuite que le spath d'Islande s'électrise positivement lorsqu'on le presse un instant entre les doigts, et que ce cristal conserve l'état électrique pendant plusieurs jours. Il reconnut la même propriété dans plusieurs espèces minérales. M. Becquerel a trouvé qu'elle appartient à tous les corps, même à ceux qui sont conducteurs, pourvu qu'ils soient isolés. Le liége et le caoutchouc, pressés l'un contre l'autre, pren-

nent, le premier l'électricité positive, le second l'électricité négative. Un disque de liége, pressé sur une orange, emporte avec lui une quantité considérable d'électricité positive, lorsqu'on interrompt vivement le contact; mais si l'on n'enlève que lentement le disque de liége, la quantité d'électricité est très-faible; ce qui provient de ce que les deux électricités séparées sur les deux corps par la pression se recomposent en partie au moment où elle cesse. C'est par cette raison que l'effet est nul quand les substances pressées sont toutes les deux conductrices de l'électricité.

M. Becquerel a encore observé que le *clivage*, c'est-à-dire la division naturelle des substances minérales cristallisées, peut être une source d'électricité. Si l'on clive rapidement une feuille de mica dans l'obscurité, on observe une lueur phosphorescente. Pour s'assurer que le phénomène a bien pour cause l'électricité, M. Becquerel a fixé, avant leur séparation, chaque lame à un manche de verre; les séparant ensuite rapidement et les présentant au pendule électrique ou à un électroscope à feuille d'or (698), il a trouvé qu'elles possèdent une électricité contraire.

Le talc feuilleté et toutes les substances cristallisées, peu conductrices, s'électrisent par le clivage. En général, toutes les fois qu'on sépare deux molécules, chacune d'elles prend une électricité différente, à moins que le corps auquel elles appartiennent ne soit bon conducteur, car alors la séparation ne peut être assez rapide pour s'opposer à la recomposition des deux électricités. C'est au phénomène que nous venons de décrire qu'il faut rapporter la lumière que répand le sucre quand on le casse dans l'obscurité.

Quant à l'électricité dégagée par les actions chimiques ou par la chaleur, elle sera étudiée plus tard (746 et 794).

CHAPITRE II

MESURE DES FORCES ÉLECTRIQUES

684. Lois des attractions et des répulsions électriques. — Les actions mutuelles qui s'exercent entre les corps électrisés sont soumises aux deux lois suivantes :

1° *Les répulsions et les attractions entre deux corps électrisés sont en raison inverse du carré de la distance.*

2° *A distance égale, ces mêmes forces sont en raison composée des quantités d'électricité que possèdent les deux corps;* c'est-à-dire *proportionnelles au produit des quantités d'électricité sur les deux corps.*

Première loi. — Ces deux lois ont été démontrées par Coulomb au moyen de la balance de torsion, déjà employée pour la démonstration des lois des attractions et des répulsions magnétiques (669). Elle se compose d'une cage cylindrique de verre de 35 centimètres de diamètre (fig. 565). Sur son contour est collée une

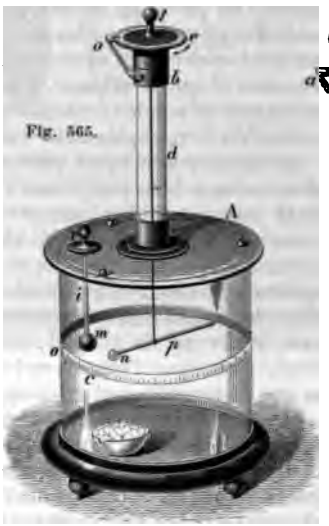


Fig. 566.

bande de papier qui porte une graduation en 360 degrés. La cage est fermée par un plateau de verre A, au centre duquel s'élève un tube *d* de même matière. Ce tube n'est point fixé invariablement au plateau, mais peut tourner librement sur lui-même. A sa partie supérieure est une garniture de laiton formée de deux pièces (fig. 566), l'une *b* fixée au tube, l'autre *k* s'engageant dans la première au moyen d'une douille, afin que par le bouton *t* on puisse la tourner à volonté. La pièce *k* porte un cadran *e* divisé en 360 degrés et tournant avec elle; et à la pièce *b* est adapté un indicateur *a*, qui, par un point de repère, marque de combien de degrés on fait tourner le cadran *e*. Au centre de celui-ci et en dessous est fixé un fil d'argent très-fin, auquel est suspendue une aiguille de gomme laque *p*, terminée à un bout par un disque de clinquant *n*. Enfin, le plateau de verre est percé d'un trou *r* par lequel on introduit dans la cage un tube de verre *i*, qui porte une boule de laiton *m*. Ajoutons que la distance entre cette boule et

nesure par l'arc gradué *oc*, compris de *m* à *n*, que l'on considère étant assez petits pour que icer les cordes par leurs arcs.

: la première loi, on commence par dessécher l'appareil, afin de diminuer la déperdition de 'on obtient en plaçant sous la cage, pendant plu- capsule remplie de chaux vive. Lorsque l'air est séché et que le zéro du disque *e* correspond au ne le tube *d* jusqu'à ce que l'aiguille *p* soit di- du cercle gradué *c*, position à laquelle corres- orsqu'elle est dans la cage. Prenant alors cette in de la tenir par le tube isolant *t*, on l'électrise ontact avec une source d'électricité, avec la ma- ar exemple; puis on la porte dans la cage. Aus- 'électrisant au contact de la boule, est repoussé, ı oscillations, s'arrête lorsque la torsion du fil force répulsive qui s'exerce entre le disque et ıs que la torsion marquée alors par l'aiguille, sur e 20 degrés; la torsion du fil étant proportion- torsion (71, 2°), ce nombre 20 peut être regardé ınt la répulsion électrique à la distance où est esurer cette force à une distance moindre, on , dans le sens de la flèche, jusqu'à ce que la dis- t *n* à la boule *m* ne soit plus que de 10 degrés, : fois moindre. Or pour amener l'aiguille à ce u'il faut tourner de 70 degrés. Le fil d'argent est extrémité supérieure, de 70 degrés dans le sens 10 degrés en sens contraire, à sa partie infé- quent, les deux torsions s'ajoutent pour donner de 80 degrés, c'est-à-dire quadruple de celle qui distance double; d'ailleurs, la force de torsion le et contraire à la répulsion, il faut que celle-ci venue quatre fois plus grande pour une distance . On vérifie de même que pour une distance trois ɔulsion est neuf fois plus grande; ce qui démon- lsions.

:tions se démontre par la même méthode, en ɔ et au disque des électricités contraires, et en ; leur attraction par une torsion opposée.

- Pour démontrer que les forces électriques sont aux quantités d'électricité que possèdent les e encore la boule de cuivre *m*, puis, notant la ée à l'aiguille *pn*, on retire la boule *m*, et on la

conclut qu'entre deux corps électrisés, la répulsion ou la
est à la fois proportionnelle à la quantité d'électricité de
et par conséquent au produit des charges électriques.

D'après les lois de Coulomb, si l'on représente par f la force attract
pulsive, à l'unité de distance, pour une charge électrique égale à 1, e
e' les charges électriques de deux corps en présence, la répulsion ou l'

F entre ces deux corps, à la distance d, est donnée par la formule 1

* 685. **Expériences de Harris.** — M. Harris a fait, en Angleterre
de nombreuses expériences pour vérifier les lois de Coulomb. Le sava
a fait usage d'un appareil ayant du rapport avec la balance de Coul
qui en diffère en ce que l'aiguille mobile, au lieu d'être suspendue à
est soutenue, de même que l'avait déjà fait Gauss dans son *magnéto*
deux fils de cocon parallèles, très-rapprochés l'un de l'autre, et à égal
du centre de gravité de l'aiguille; d'où le nom de *balance bifilaire* d
appareil. De ce mode de suspension il résulte que, dès qu'une des ext
l'aiguille mobile est repoussée ou attirée, les deux fils se tordent plus
selon l'intensité de la force qui agit sur l'aiguille, et que par suite cell
jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse entre la pesanteur qui tend à l'ab
force électrique qui tend à la faire remonter par l'effet de la déviation
M. Harris a constaté que les oscillations de l'aiguille sont alors isoc
que la force qui la maintient à une certaine distance angulaire de l
d'équilibre est proportionnelle à cette distance.

M. Harris a aussi expérimenté avec une balance ordinaire, très-s
faisant équilibre, au moyen de poids placés dans l'un des plateaux, s
tions électriques qui s'exerçaient sur un disque fixé à l'autre plateau

En expérimentant avec ces deux appareils, M. Harris a tro
mière loi de Coulomb, celle de l'inverse du carré de la
plus quand les deux corps électrisés sont chargés de qu
tricité, et la tension très-faible; et enfin quand la distance aux

'est ce que confirment les expériences de M. Marié-Davy, qui, ayant répété s de M. Harris, a reconnu que la loi des distances se vérifie très-approxi- tivement pour deux sphères égales, distantes de plus de 9 à 10 fois leur rayon.

86. Accumulation de l'électricité à la surface des corps, tension. Lorsqu'un corps bon conducteur et isolé est électrisé, soit po- vement, soit négativement, l'électricité libre se porte à la face du corps, où l'on admet qu'elle forme une couche extrê- nent mince. Cette accumulation à la surface se démontre par expériences suivantes, dont les deux premières sont dues à lomb.

1. On prend une sphère de cuivre creuse, isolée sur un pied erre, et percée, à sa partie rieure, d'une ouverture ulaire (fig. 567). Après l'a- électrisée en la mettant en act avec une source élec- ne, on la touche successi- ent, à l'intérieur et à l'exté- r, avec un *plan d'épreuve.* omme ainsi un bâton de me laque à l'extrémité du- l est fixé un petit disque de uant qui sert à recueillir tricité. Ce disque doit être iqué à plat sur le corps risé; se substituant ainsi surface qu'il recouvre, il il une quantité d'électricité blement égale. Or, en tou- ut extérieurement la sphère électrisée avec le plan d'épreuve, ueille de l'électricité; car ce plan étant présenté à l'aiguille la balance de torsion (fig. 565), il y a attraction. Mais si touche la surface interne, on n'observe aucune trace d'élec- tion; d'où l'on conclut qu'il n'y a d'électricité libre qu'à la ce externe.

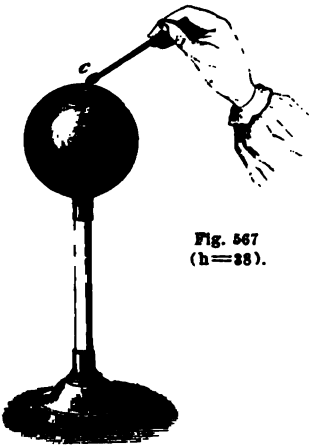


Fig. 567 (h=38).

2. On a une sphère de cuivre isolée sur un pied de verre; sur sphère s'appliquent deux hémisphères creux, aussi de cui- de même diamètre qu'elle, pouvant la recouvrir exactement ulever à volonté à l'aide de manches de verre Après avoir risé la sphère, on applique dessus les deux hémisphères n tient par les manches de verre, puis on les retire brus- ment et bien ensemble (fig. 568). On observe qu'ils sont alors risés tous les deux, mais que la sphère n'a conservé aucune

trace d'électricité. L'électricité communiquée à la sphère était donc tout entière à la surface, puisqu'elle a été complétement enlevée en même temps que les deux enveloppes.

3° On peut encore constater que l'électricité se porte à la surface des corps, au moyen d'un cylindre de cuivre isolé sur lequel est fixée une feuille métallique flexible, qu'on enroule ou déroule à volonté, en faisant tourner le cylindre à l'aide d'une manivelle

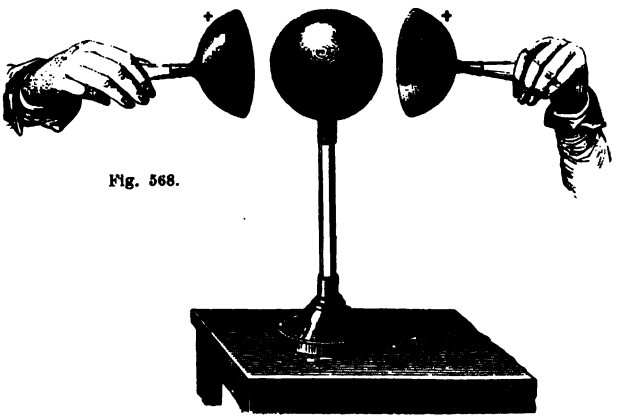


Fig. 568.

(fig. 569). Sur une boule de métal, en communication avec le cylindre, est fixé un électromètre, composé d'un cadran d'ivoire, au centre duquel tourne une tige légère terminée par une petite boule de sureau. Lorsqu'on communique de l'électricité au cylindre, la boule diverge en vertu d'une répulsion électrique. Si l'on tourne alors le cylindre de manière à dérouler lentement la feuille, la divergence diminue; en l'enroulant de nouveau, elle augmente. Donc, la quantité totale d'électricité possédée par un corps restant la même, la répulsion, en un point quelconque de la surface, est d'autant moindre, que celle-ci est plus grande; ce qui montre que l'électricité se porte à la surface.

4° Une quatrième expérience, due à Faraday, consiste à fixer sur un cerceau isolé une poche conique de mousseline, semblable à celle dont on se sert pour prendre des papillons (fig. 570). Au moyen de deux fils de soie attachés des deux côtés au sommet du cône, on peut le retourner à volonté. Cela posé, on électrise la mousseline en la touchant avec un corps électrisé, et l'on trouve, à l'aide du plan d'épreuve, que sa surface extérieure est seule électrisée; puis, tirant le fil de soie intérieur, on retourne

e, de manière que sa surface interne devienne externe, et quement; or on reconnaît alors que c'est encore la surface qui est seule électrisée.

nfin, l'expérience montre qu'une sphère de métal massive

Fig. 569.

d pas plus d'électricité qu'une sphère de bois de même re recouverte d'une feuille de métal très-mince.

lifférentes expériences ont conduit les physiciens à consi- 'électricité libre comme accumulée, sous forme d'une cou- rêmement mince, à la surface des corps électrisés, dont d sans cesse à s'échapper avec un effort plus ou moins .

lon Faraday, la tendance de l'électricité à se porter à la surface des corps urs est plus apparente que réelle, et les expériences qui constatent qu'il lectricité libre qu'à leur surface s'expliquent facilement d'une autre ma- après sa théorie, aucune charge électrique ne peut se manifester dans r d'un corps à cause des directions opposées des électricités dans cha- particules intérieures, d'où résulte un effet nul, tandis que l'induction ercée par les corps extérieurs rend sensible l'électricité à la surface. cette manière de voir, l'électricité doit se montrer seulement à la surface veloppe conductrice, quelle que soit la conductibilité ou la faculté iso- la substance placée intérieurement. C'est ce que Faraday a démontré

L'effort avec lequel l'électricité tend ainsi à se dégager des corps se nomme *tension;* on va voir les causes qui la font varier.

687. **Influence de la forme des corps sur l'accumulation de l'électricité.** — Sur une sphère métallique, l'épaisseur de la couche électrique est la même en chaque point de la surface. Il est évident, en effet, qu'il doit en être ainsi d'après la forme symétrique du corps. On le vérifie au moyen du plan d'épreuve et de la balance de torsion (fig. 565). Pour cela, on électrise une sphère isolée pareille à celle de la figure 568, et la touchant successivement en différents points avec le plan d'épreuve, on présente chaque fois celui-ci à l'aiguille de la balance. Or on observe constamment la même torsion, ce qui fait voir que partout le plan d'épreuve a recueilli la même quantité d'électricité.

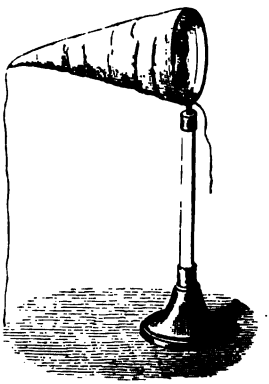


Fig. 570.

Si le corps électrisé est un ovoïde allongé (fig. 571), l'épaisseur de la couche électrique cesse d'être uniforme; l'électricité, obéissant toujours à sa propre répulsion, s'accumule vers les parties les plus aiguës, sur lesquelles elle acquiert un maximum d'épaisseur. Pour le démontrer, on touche l'ovoïde en différents points avec le plan d'épreuve, et portant celui-ci dans la balance de Coulomb, on reconnaît que le maximum de torsion se produit lorsqu'on a touché l'extrémité *a*, et le minimum lorsque le plan d'épreuve a touché la région moyenne *e*.

Quelle que soit la forme d'un corps électrisé, l'analyse mathématique fait voir qu'en chaque point de la surface, la tension (686)

en électrisant fortement de l'essence de térébenthine placée dans un vase de métal : il n'y avait d'électricité apparente qu'à la surface extérieure du vase. Il a même construit une chambre cubique, d'un mètre de côté, dont les parois de bois étaient recouvertes extérieurement de feuilles de plomb; il l'a isolée, puis, après y avoir placé des électroscopes et autres objets, il a électrisé l'air intérieur avec une forte machine. Aucune trace d'électricité ne s'est manifestée au dedans, tandis que des étincelles considérables et des aigrettes lumineuses partaient dans tous les sens de la surface extérieure. Ces expériences, en complétant celles de Coulomb, dans lesquelles il ne s'agissait que de corps conducteurs, rendent peu probable l'explication qu'on en donnait, vu qu'elle était basée sur la libre propagation de l'électricité dans la masse conductrice, d'où résultait que cette électricité se portait toute à la surface. Une fois que le phénomène a lieu de la même manière avec des corps isolants placés intérieurement, cette explication n'est plus soutenable. » (De la Rive, *Traité d'électricité*, t. I, p. 143.)

t proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique; que, dans le cas d'un ellipsoïde parfait, l'épaisseur de cette uche, aux extrémités des axes, est proportionnelle à leur lon-

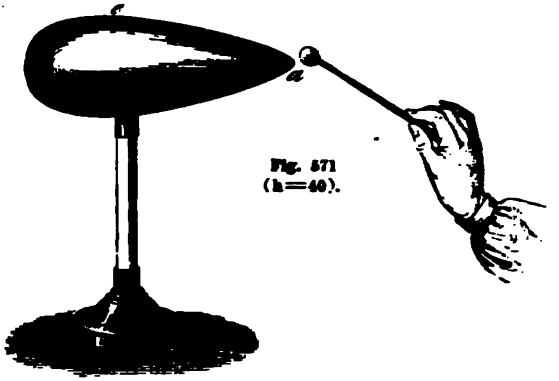


Fig. 571
(h=40).

ur. Dans le cas d'un disque de métal, c'est sur les bords que cumule l'électricité.

68. Pouvoir des pointes. — On nomme *pouvoir des pointes* sur corps conducteurs la propriété qu'elles possèdent de laisser ler l'électricité. Cette propriété, découverte par Franklin, plique par la distribution de l'électricité à la surface des corps. ellet, celle-ci s'accumulant vers les parties aiguës, l'épaisseur trique croît vers les pointes, et la tension, croissant en me temps, l'emporte bientôt sur la résistance de l'air; c'est s que l'électricité se dégage dans l'atmosphère. Si l'on appro- la main de la pointe, on ressent un souffle léger, dû à la ré- ion de l'air, et si le dégagement d'électricité a lieu dans l'obs- ité, on remarque sur la pointe une aigrette lumineuse.

69. Communication et distribution de l'électricité sur les corps ntact. — Lorsqu'on met en contact deux corps conducteurs, électrisé, l'autre à l'état neutre, il y a partage de l'électricité e les deux corps dans un rapport qui dépend de celui de leurs faces; et lorsqu'on les sépare, l'un a gagné, l'autre a perdu de ctricité sur tous ses points. S'ils ne sont pas conducteurs, il a perte ou gain que sur les points en contact.

l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion, Coulomb it de nombreuses expériences sur la distribution de l'électri- à la surface des corps en contact. Avec des sphères métalliques ées, mises en contact et électrisées dans cet état, il a trouvé l'électricité se distribue diversement sur leurs surfaces, sui-

vant le rapport des diamètres. S'ils sont égaux, la tension électrique est nulle au point de contact, ne devient sensible qu'à 20 degrés de ce point, croît rapidement de 20 à 30 degrés, plus lentement de 60 à 90, et reste à peu près la même de 90 à 180.

Si les diamètres sont dans le rapport de 2 à 1, la tension, qui est encore nulle au point de contact, est d'abord plus considérable sur la grande sphère; mais elle augmente ensuite plus rapidement sur la petite, et à 180 degrés du point de contact, c'est sur elle qu'a lieu la plus forte tension.

690. **Déperdition de l'électricité dans l'air.** — Les corps électrisés, quoique isolés, perdent toujours plus ou moins rapidement leur électricité. Cette déperdition s'opère par l'air et les vapeurs qu'il contient, et aussi par les isoloirs qui servent de supports aux corps électrisés.

L'air sec est très-mauvais conducteur; cependant, en s'électrisant au contact des corps électrisés, il est pour eux une cause continue de déperdition : les molécules d'air électrisées étant repoussées, de nouvelles molécules viennent prendre leur place, s'électrisent à leur tour pour être repoussées aussitôt, et de là une déperdition d'autant plus sensible que la tension est plus forte. D'après Coulomb, *dans un air calme et à un état hygrométrique constant, la déperdition, dans un temps très-court, est proportionnelle à la tension* : loi analogue à celle de Newton sur le refroidissement (419).

D'après Matteucci, à température et à pression égales, la perte est la même dans l'air, dans l'hydrogène et dans l'acide carbonique, quand ces gaz sont complétement desséchés; avec des corps fortement électrisés, la déperdition est plus grande quand ils sont électrisés négativement que lorsqu'ils le sont positivement; dans les gaz secs, à pression constante, la déperdition augmente avec la température; enfin, toujours dans les gaz secs, la perte est indépendante de la nature du corps électrisé, c'est-à-dire qu'elle est la même, que celui-ci soit conducteur ou isolant.

Quant à la perte par les supports, non-seulement ceux-ci n'isolent jamais complétement, mais Coulomb a trouvé qu'ils sont la source d'une abondante déperdition pour les corps fortement électrisés. Cette déperdition diminue graduellement et devient constante lorsque la tension électrique est très-affaiblie. Elle peut même alors être négligée, si l'on donne aux isoloirs une longueur suffisante : longueur qui, d'après Coulomb, doit augmenter proportionnellement au carré de la tension électrique du corps à isoler. La gomme laque isole alors à peu près complétement; mais le verre, qui est hygrométrique, doit être desséché avec soin.

ion de l'électricité dans le vide. — L'électricité étant rface des corps par la mauvaise conductibilité de ui-ci se raréfie, la déperdition augmente, et dans ésistance est nulle, il semble que toute électricité per. C'est, en effet, ce qu'on a d'abord admis, et à laquelle on était arrivé par le calcul. Cependant y, M. Harris, M. Becquerel et M. Grove ont montré de, des tensions électriques faibles peuvent être Becquerel a même observé que, dans le vide à un corps conservait encore de l'électricité après quinze ant admet que si un corps électrisé se trouvait dans , loin de toute matière qui pût exercer sur lui une ence (692), il conserverait indéfiniment une cer- lectrique. Depuis, M. Gassiot a fait voir que dans par des procédés chimiques (vide le plus parfait oduire), la décharge électrique ne passe pas. Une Hittorf, que nous donnons plus loin, prouve le si est-il généralement admis aujourd'hui que la milieu pondérable est nécessaire à la propagation

---

CHAPITRE III

DUCTION, MACHINES ÉLECTRIQUES

ation par influence ou par induction. — Un corps ur un corps à l'état neutre de la même manière git sur le fer doux (649); c'est-à-dire que, décom- cité neutre, il attire l'électricité de nom contraire ssède et repousse celle de même nom. Pour expri- qui est une conséquence de l'action mutuelle des és, on dit que le corps qui était d'abord à l'état intenant *électrisé par influence* ou *par induction;* *induisant* ou *inducteur* le corps qui agit par induc- celui sur lequel il agit.

l'électrisation par influence au moyen d'un cy- n A, isolé sur un pied de verre, et portant à ses x petits pendules électriques formés de balles de lues par des fils de chanvre, qui sont conducteurs qu'on place ce cylindre à une certaine distance de teurs M de la machine électrique, celle-ci, qui,

ainsi qu'on le verra bientôt, est chargée d'électricité positive, agissant par influence sur l'électricité neutre du cylindre, la décompose, attire l'électricité négative et repousse la positive; en sorte que les électricités se distribuant comme l'indiquent les signes + et — sur la figure, chaque pendule est repoussé.

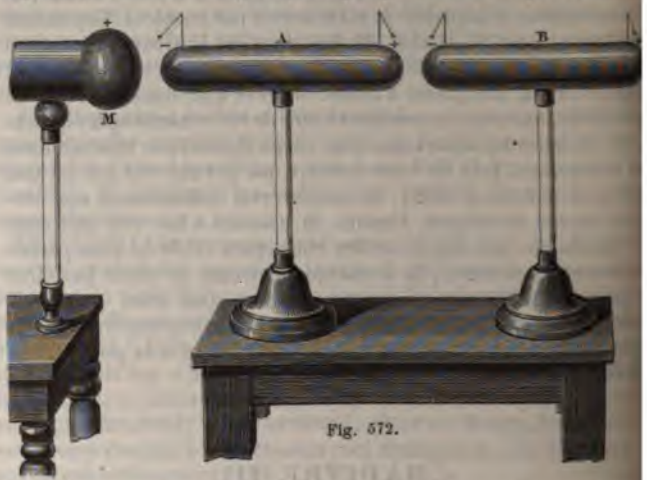


Fig. 572.

Pour reconnaître l'espèce d'électricité dont sont chargées les extrémités du cylindre, on frotte un bâton de cire d'Espagne, et le présentant au pendule le plus rapproché de la machine électrique, on observe une répulsion, ce qui montre que ce pendule est chargé de la même électricité que la résine, c'est-à-dire d'électricité négative. En présentant de même au second pendule un tube de verre frotté, il y a également répulsion; donc ce pendule est électrisé positivement. Par conséquent, un corps électrisé par influence possède à la fois, sur deux régions opposées, les deux espèces d'électricités à l'état libre. Entre ces parties électrisées en sens contraires se trouve nécessairement une zone à l'état neutre. On le vérifie en disposant plusieurs petits pendules à balles de sureau le long du cylindre : leur divergence décroît rapidement en s'éloignant des extrémités, et devient nulle en un certain point, qui est le *point neutre*. Ce point n'est jamais au milieu du cylindre; sa position dépend de la charge électrique et de la distance du cylindre au corps induisant; mais il est toujours plus près de l'extrémité la plus rapprochée de ce corps.

Un corps électrisé par influence agit à son tour sur les corps

isins pour séparer les deux électricités; c'est ce que montre la
position relative des signes + et — sur un second cylindre B
cé à la suite du cylindre A.

Tout corps électrisé par influence présente les deux phénomènes
ivants : 1° *Aussitôt que l'influence cesse, les deux électricités
recomposent, et le corps revient à l'état neutre.* Ce principe
rifie avec le cylindre A ci-dessus; car les pendules retom-
dès qu'on l'éloigne de la machine électrique, ou dès qu'on
ne celle-ci à l'état neutre en la touchant avec le doigt. 2° Lors-
un corps conducteur est électrisé par influence, si on le touche
un quelconque de ses points, soit avec une tige métallique,
avec le doigt, *c'est toujours l'électricité de même nom que
le de la source qui s'écoule dans le sol, l'électricité de nom
traire étant retenue par celle de la source.* Par exemple, dans
cylindre A, c'est l'électricité négative qui reste, soit qu'on
che l'extrémité positive, la négative, ou la partie médiane.

C'est par un effet d'électrisation par influence qu'une machine
trique ne peut se charger s'il se trouve, dans son voisinage,
pointe métallique en communication avec le sol; en effet,
tricité positive de la machine agissant par influence sur la
nte, il s'écoule de celle-ci (688) un courant continu d'électri-
é négative qui neutralise l'électricité de la machine.

Les effets par influence qui viennent d'être étudiés ne s'appli-
nt qu'aux corps bons conducteurs. Sur les mauvais conduc-
rs, l'action par influence est nulle, ou du moins très-faible, et
peut se produire que lentement, à une faible épaisseur, et en
sence d'une source électrique assez puissante, vu la grande
tance que rencontre alors l'électricité à se mouvoir.

Par la même cause, lorsqu'un corps mauvais conducteur est une
a électrisé par influence, il l'est encore longtemps après que
tion induisante a été écartée.

683. Appareil de Riess pour constater l'influence. — Le cylindre
izontal de la figure 572, dû à Æpinus, a été longtemps le seul
areil en usage pour démontrer l'électrisation par influence.
a objecté à l'emploi de cet appareil qu'il ne démontre pas que
trémité la plus rapprochée de la source soit électrisée, parce
la divergence du pendule correspondant peut s'expliquer par
traction de l'électricité du corps M. Pour éviter cette objec-
n, Riess a adopté un cylindre de laiton, muni d'un manche de
re, et armé, dans toute sa longueur, de petits pendules de
elle de sureau (fig. 573). Tenant le manche à la main, on pré-
nte le cylindre verticalement à une source électrique, par
mple à un gâteau de résine électrisé négativement. Les pen-

dules divergent aussitôt; mais ici l'écart du pendule inférieur ne saurait être attribué à l'attraction de l'électricité du plateau de résine, car cette attraction tend évidemment à maintenir le pendule vertical. Donc l'extrémité A est bien électrisée. On vérifie, comme pour le cylindre horizontal, qu'elle l'est positivement, et B négativement.

Fig. 573.

694. **Limite à l'électrisation par influence.** — L'action par influence qu'exerce un corps électrisé sur un corps voisin pour décomposer son électricité neutre est limitée. En effet, sur la surface d'un cylindre isolé soumis à l'influence de la machine électrique, se en n une quantité aussi petite qu'on voudra d'électricité neutre (fig. 574). L'électricité positive de la source m, que nous supposons constante, agit d'abord seule pour décomposer l'électricité neutre en n, attirer en A l'électricité négative et repousser en B la positive; mais à mesure que l'extrémité A se charge d'électricité négative, et l'extrémité B d'électricité positive, il se développe en A et en B deux forces f et f' agissant sur n en sens contraire

Fig. 574.

de la source. En effet, les forces f et f', tant par attraction que par répulsion, concourent pour appeler en B l'électricité négative de n, et en A l'électricité positive. Or la force induisante F, qui s'exerce en m, étant limitée, tandis que les forces f et f' sont croissantes, il arrive un moment où l'équilibre s'établit entre la force F et les forces f et f'. Alors toute décomposition cesse et l'action induisante a atteint sa limite.

Si l'on éloigne le cylindre de la source m, l'action par influence

une portion des électricités libres en A et en B se re-
ir former de l'électricité neutre. Au contraire, si on
, la force F l'emportant sur les forces f et f', une nou-
position se produit, et de plus grandes quantités d'é-
positive et négative s'accumulent en A et en B.

e de Faraday sur l'électrisation par influence, polarisation. —
'électrisation par influence, telle que nous venons de la faire con-
e admise par tous les physiciens; mais les travaux de Faraday
électrique tendent à la modifier. En effet, jusqu'à présent on
m compte, dans les phénomènes que nous venons de considérer,
épare le corps électrisé de celui sur lequel il agit par influence.
s expériences de Faraday conduisent plutôt à admettre que c'est
aire même de ce milieu que s'opèrent tous les phénomènes par
ion par une action à distance, ou du moins à une distance qui
intervalle entre deux molécules adjacentes. Faraday admet qu'il
s dans le milieu intermédiaire, de molécule à molécule, une suite
nes d'électricité neutre telles, que chaque molécule prend deux
s contraires, et c'est cet état qu'il désigne sous le nom de *pola-*
milieu. Ce serait donc, dans cette théorie, à la polarisation des
air, ou d'un autre milieu, que serait due l'action qu'exercent les
sur les corps à l'état neutre; tandis que, dans la théorie admise
ne joue qu'un rôle passif, et ne fait, par sa non-conductibilité,
la recomposition des électricités contraires. En un mot, la théorie
ed à supprimer l'action à distance pour la remplacer par l'action
stante d'un milieu, d'une matière intermédiaire propre à trans-
d'un corps à un autre. Remarquons que, dans la nouvelle
ctricité (679), le fluide éthéré qui remplit l'espace tient lieu du
fluaire que demandait Faraday.

t *pouvoir inducteur* la propriété qu'ont les corps de transmettre
ur masse l'influence électrique, Faraday trouve que tous les corps
nas le même pouvoir inducteur. Pour cela, il a fait usage de l'ap-
té dans la figure 576, dont la figure 575 donne une coupe verti-
ose d'une enveloppe sphérique PQ, formée de deux hémisphères de
sparent comme les hémisphères de Magdebourg (fig. 103, page 112),
s'appliquent bord à bord, de manière à fermer hermétiquement.
r de cette enveloppe est une sphère de laiton C, d'un diamètre
'enveloppe et communiquant avec une boule extérieure B, au
tige métallique qui est isolée de l'enveloppe PQ par une couche
me laque A. Quant à l'intervalle mn, il est destiné à recevoir la
on veut mesurer le pouvoir inducteur. Enfin, le pied de l'appa-
conduit à robinet, et peut se fixer sur la machine pneumatique
retirer l'air compris dans l'espace mn, ou le raréfier.

pparcils semblables à celui que nous venons de décrire, identiques
ne contenant d'abord tous les deux que de l'air dans l'intervalle
enveloppes PQ communiquant avec le sol, on met la boule B de
eils en communication avec une source d'électricité. La sphère C
à la manière de l'armature intérieure de la bouteille de Leyde, la
s représentant la lame isolante qui sépare les deux armatures. L'ap-
chargé, on mesure la tension de l'électricité restée libre sur la sphère
t la boule B avec un plan d'épreuve, et en portant celui-ci dans la
lomb. Faraday a obtenu ainsi une torsion de 250°, qui représentait
a sphère C. Mettant enfin la boule B de l'appareil ainsi chargé en
avec la boule B du second appareil non encore chargé, on trouve,

à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion, que la tension sur les deux sphères C est sensiblement 125, c'est-à-dire que l'électricité s'est distribuée également sur les deux appareils; ce qu'on pouvait prévoir d'avance, puisqu'ils sont identiques et contiennent tous les deux de l'air dans l'intervalle *mn*.

Cette première expérience faite, on la répète, mais en remplissant préalablement l'intervalle *mn*, dans le second appareil, de la substance dont on veut étudier le pouvoir inducteur, soit de gomme laque. Puis, ayant chargé l'autre appareil, celui dans lequel l'intervalle *mn* est toujours rempli d'air, on mesure la

Fig. 575.

Fig. 576.

tension sur la boule C; supposons qu'elle soit 290, nombre trouvé par Faraday. Or, si actuellement on fait communiquer la boule B de l'appareil chargé avec la boule B de l'appareil où est la gomme laque, on ne trouve plus, comme ci-dessus, que chaque appareil possède la moitié de 290, ou 145. En effet, l'appareil à air accuse seulement une tension 114, et celui à gomme laque une tension 113. L'appareil à air qui avait 290, et n'a plus que 114, a donc perdu 176 : par conséquent on devrait trouver sur l'appareil à gomme laque 176 au lieu de 113. Puisqu'on ne retrouve que 113, cela montre qu'une plus grande quantité d'électricité a été neutralisée au travers de la couche de gomme laque qu'au travers de la couche d'air de même épaisseur dans la première expérience, d'où l'on conclut que le pouvoir inducteur de la gomme laque est plus grand que celui de l'air[1].

1. « La théorie de Faraday, dit M. de la Rive, quoique ayant encore besoin d'être élaborée, mérite cependant déjà d'attirer l'attention sérieuse des physiciens. Elle semble reposer sur un principe juste, celui que les actions électriques ne se manifestent jamais que par l'intermédiaire des particules matérielles ; elle tend à opérer un rapprochement remarquable entre les forces électriques et les autres forces de la nature. Enfin, des expériences de Faraday il résulte déjà un point important acquis à la science, savoir, le fait de la polarisation moléculaire dans les corps isolants, et la probable de propagation de l'électricité dans les corps conducteurs également. »

[redacted]

it comme ci-dessus, on trouve qu'en représentant par 1 le pouvoir l'air, les pouvoirs inducteurs relatifs des substances suivantes sont :

. . . . .	1,..	Cire jaune.	1,86
. . . . .	1,76	Verre	1,90
. . . . .	1,77	Gomme laque.	2,..
. . . . .	1,80	Soufre.	2,24

: gaz, Faraday a trouvé qu'ils ont tous sensiblement le même pou-ır, et que ce pouvoir n'est modifié ni par la température ni par la gaz.

capacité inductrice propre que possèdent les corps isolants, Fara-à ces corps le nom de *diélectriques*, par opposition aux corps con-ne jouissent pas de la même propriété. Le même physicien, qui a le approfondie du rôle joué par les diélectriques dans l'induction, ces deux résultats :

point induction au travers des corps conducteurs lorsqu'ils sont en on avec le sol.

tion d'un corps sur un autre peut s'exercer en ligne courbe quand s corps est interposé un diélectrique.

ces principes ne sont point acceptés par tous les physiciens, les qui y ont conduit Faraday pouvant être interprétées autrement ont été par ce savant.

qui a aussi étudié l'induction des corps électrisés sur les corps lucteurs, a été amené à admettre la polarisation électrique molé-trouvé, en outre, que le pouvoir isolant d'une substance est d'au-nd, que sa polarisation moléculaire est plus faible.

onc des travaux de Faraday et de ceux de Matteucci que les corps lucteurs peuvent transmettre lentement l'électricité non-seulement ace, mais par leur masse. Par exemple, lorsqu'un bâton de résine lque temps en contact avec une machine électrique chargée, on il est électrisé positivement sur une plus ou moins grande étendue. t alors avec de la laine, il s'électrise négativement, puis peu à peu t neutre, et enfin l'électricité positive reparaît; ce qui résulte de ce té de la machine ayant polarisé les molécules jusqu'à une certaine pro-ont celles-ci qui, réagissant ensuite sur la surface, la ramènent à puis à l'état positif.

nmunication de l'électricité à distance, décharge disrup-

ns l'expérience de la figure 572, les électricités con-conducteur M et du cylindre tendent à se réunir, et tent maintenues à la surface de ces deux corps que par ce de l'air; mais si la résistance diminue, ou si la ten-nte, la force attractive des deux électricités l'emporte le qui les sépare, et elles se recomposent au travers de nnant naissance à une étincelle plus ou moins vive ée d'un bruit sec. L'électricité négative du cylindre se nsi neutralisée par l'électricité positive que lui a cédée , il ne reste plus sur le premier que de l'électricité u'il conserve, quoique l'influence vienne à cesser.

la distance explosive, elle varie avec la tension, la orps, leur pouvoir conducteur, et le plus ou moins de les milieux ambiants.

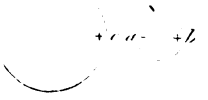


Fig. 577.

1° *Le corps mobile est à l'éta conducteur.* — Dans ce cas, le agissant par influence sur l' neutre du corps N, attire l'électri tive et repousse la positive, de le maximum de tension des deux électricités a lieu r ment aux points *a* et *b*. Or, les actions électriques s'e raison inverse du carré de la distance, l'attraction entre *a* et *c* l'emporte sur la répulsion entre les points *b* et *c*, mobile s'approche du corps fixe par l'effet d'une résult à l'excès de la force attractive sur la force répulsive.

2° *Le corps mobile est électrisé et conducteur.* — S mobile est chargé d'une électricité contraire à celle du il y a toujours attraction; s'il est chargé de la même éle y a répulsion pour une certaine distance; mais plus pré avoir attraction. En effet, outre l'électricité libre que co le corps mobile, il contient aussi de l'électricité neutr ci étant décomposée par l'influence positive du corps N sphère *b* reçoit une nouvelle quantité d'électricité posi dant que l'hémisphère *a* se charge d'électricité négati donc, comme dans le cas précédent, attraction et rép seconde force l'emporte d'abord sur la première, p quantité d'électricité positive sur le corps N est plus la quantité d'électricité négative; mais l'intervalle *ac* la force attractive croît plus vite que la force répulsi

let, sous l'influence du corps M, si ce dernier est suffi-
lectrisé, et alors il y a attraction.

troscopes à feuilles d'or. — On a déjà vu (674) qu'on
ctroscopes de petits appareils qui servent à reconnaître
est électrisé et quelle est la nature de son électricité.
électrique déjà
un électroscope.
iginé plusieurs
ces appareils;
crirons, pour le
ue l'électroscope
d'or; mais bien-
erons connaître
appareil de ce
ucoup plus sen-
ctromètre con-
de Volta (725).
scope à feuilles
ste en un bocal
(fig. 578), re-
un plateau de

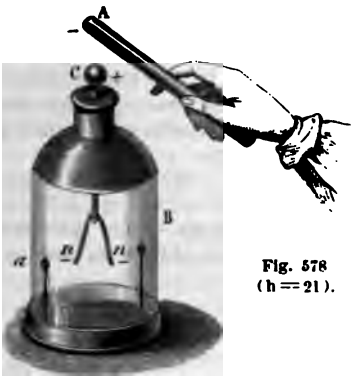


Fig. 578
(h = 21).

ont le goulot est fermé par un bouchon recouvert d'un
nt, ainsi que toute la partie supérieure du bocal. Dans
passe une tige de laiton terminée à l'extérieur par
C, de même métal, et à l'intérieur par deux feuilles
n, très-légères.

n approche de cet appareil un corps chargé d'une élec-
conque, négative par exemple, comme l'indique le des-
lectricité agissant par influence sur l'électricité neutre
et de la tige, l'électricité positive est attirée dans la
négative repoussée vers les feuilles d'or. Celles-ci, se
nsi chargées de la même électricité, se repoussent, et
qui montre que le corps A est électrisé.

gnore l'espèce d'électricité dont est chargé le corps
ésenté à l'électroscope, il est facile de la reconnaître.
tandis que l'instrument est sous l'influence du corps
he la boule C avec le doigt. L'électricité de même nom
ont est chargé le corps A est alors repoussée dans le
oule reste chargée d'une électricité *contraire* à celle
92). Les feuilles d'or retombent d'abord, toute l'élec-
t en C; mais retirant le doigt et ensuite le corps A,
gent de nouveau. Il reste à constater l'espèce d'élec-
conserve l'appareil. Pour cela, on approche lentem-

sensibilité de l'électroscope, en se chargeant par in
tricité contraire à celle des feuilles d'or.

MACHINES ÉLECTRIQUES

699. **Électrophore.** — Les *machines électriques* s
reils qui servent à obtenir un développement plus o

Fig. 379. Fig.

onducteur, conserve son électricité négative, et, par nce sur le disque, attire l'électricité positive vers la ntact avec elle, tandis qu'elle repousse sur l'autre la Touchant donc la feuille d'étain avec le doigt, c'est é négative qu'on soustrait, et le disque de bois reste ositivement. En effet, si on l'enlève d'une main par le verre, et si on lui présente l'autre main (fig. 580), e vive étincelle due à la recomposition de l'électricité disque avec l'électricité négative de la main.

air sec, le gâteau de résine de l'électrophore, une fois eut conserver son électricité pendant des mois entiers, nt obtenir, pendant tout ce temps, autant d'étincelles , sans battre de nouveau la résine avec la peau de chat, on ait soin, à chaque fois, de toucher d'abord le disque d'étain, tandis qu'il est en contact avec la résine, puis le fois, quand on le tient par le manche de verre.

stet modifie l'électrophore en remplaçant le gâteau de un disque de caoutchouc durci de 4 millimètres d'épaisment, et en plaçant sous celui-ci un disque de zinc même diamètre. Ce zinc doit communiquer le plus inpossible avec le sol par un fil de cuivre; quant au plais recouvert d'étain, il reste le même. Ainsi modifié, lonne des étincelles très-puissantes.

phore sert, en chimie, pour faire détoner, dans l'eudiomélanges gazeux au moyen de l'étincelle électrique.

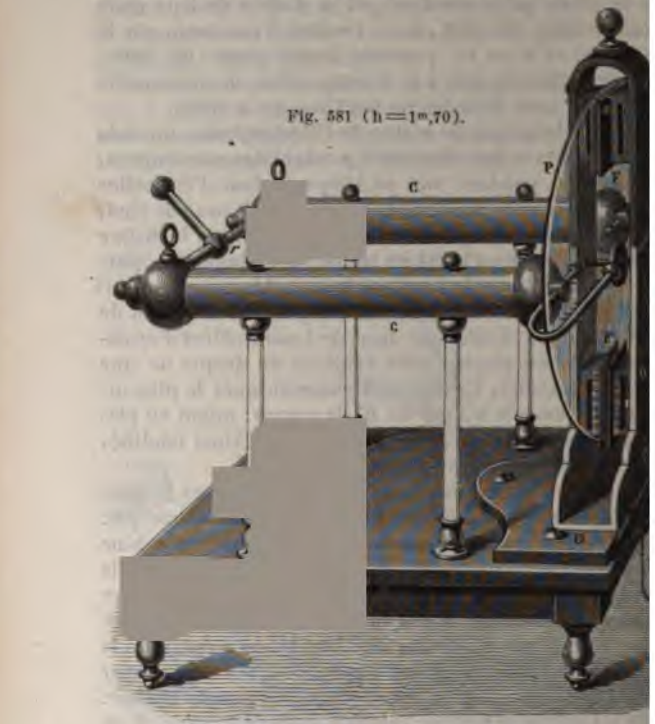
chine électrique de Ramsden. — La première machine est due à Otto de Guericke, le même qui a inventé la neumatique. Elle consistait en une sphère de soufre axe qu'on tournait d'une main, tandis que l'autre apa sphère et servait de frottoir. Bientôt on substitua à la ufre un cylindre de résine que Hawksbee remplaça par s de verre; mais la main servait toujours de frottoir.

Winkler fit usage, le premier, comme frottoir, d'un soie rembourré de crin. A la même époque, Bose rer un tube de fer-blanc suspendu à deux cordons de tricité dégagée par le frottement. Enfin, en 1766, à Londres, substitua au cylindre de verre un plateau le verre, frotté par quatre coussins. Dès lors la marique prit la forme qu'on lui donne aujourd'hui.

ux montants de bois (fig. 581) est un plateau circulaire , fixé par son centre à un axe qu'on fait tourner à l'aide ivelle. Ce plateau, suivant son diamètre vertical, est e quatre *frottoirs* ou *coussins* F, de cuir ou de soie.

Suivant son diamètre horizontal, il passe entre deux tub
ton recourbés en fer à cheval, qu'on appelle *peignes* ou *m*
parce qu'ils sont armés de dents placées, des deux côtés,
du plateau. Ces peignes sont fixés à des tubes plus gros

Fig. 581 (h = 1m,70).



nomme les *conducteurs*. Ces derniers, isolés sur quat
verre, sont reliés entre eux par un tube *r* d'un plus peti
Enfin, des bandes d'étain O, collées des deux côtés de
de bois qui portent les coussins, font communiquer ce
une chaîne métallique D et avec le sol.

Ces détails connus, la théorie de la machine éle
fondée sur l'électrisation par frottement et par influe
dant son mouvement de rotation, le plateau, en frottan
coussins, se charge d'électricité positive, et ceux-ci d
négative. Or cette dernière se perd dans le sol par les

t la chaîne D, tandis que l'électricité du plateau, ne pou-
coulier, reste sur ses deux faces sans produire aucun effet
un quart de tour, c'est-à-dire depuis le coussin supérieur
exemple, jusqu'à la mâchoire de droite. Là, l'électricité
du verre, agissant par influence sur le peigne et sur les
ours, en décompose l'électricité neutre, repousse la positive
e par les pointes la négative, qui vient se réunir à l'élec-
ositive du plateau. La portion de celui-ci qui vient d'agir
onducteurs se trouve donc ramenée à l'état neutre jusqu'à
e vienne passer entre les coussins inférieurs. Là elle s'é-
le nouveau, et agit ensuite sur le deuxième peigne comme
mier; et ainsi de suite. Le plateau ne cède donc rien aux
ours; il ne fait qu'en soutirer l'électricité négative, et
qu'ils restent chargés d'électricité positive.
me une fois chargée, si l'on en approche la main, on
rte étincelle, qui se renouvelle tout le temps qu'on
plateau; car l'étincelle étant le résultat de la combi-
électricités contraires de la main et de la machine,
, à chaque étincelle, à revenir à l'état neutre; mais
mesure l'influence du plateau l'électrise de nouveau.
à donner aux machines électriques. — Pour donner à
électrique toute son activité, il importe de dessécher
s supports, le plateau et les coussins. Pour cela, on
oucement, et on les essuie avec un linge chaud.
es méritent une attention toute particulière, tant pour
tion que pour leur bon état d'entretien. Ceux qui sont
usage sont de cuir mince, rembourrés de crin et en-
mussif, matière pulvérulente qui n'est autre chose que
sulfure d'étain, et qui augmente beaucoup le développe-
l'électricité, probablement par une décomposition chi-
omme l'indique l'odeur sulfureuse que répandent les
pendant le frottement. Cependant, tout en reconnaissant
ubstances oxydables, et qui dans les actions chimiques
les effets les plus énergiques, sont aussi celles qui dans
nent dégagent le plus d'électricité, M. Ed. Becquerel ad-
l'état moléculaire des corps frottés influe beaucoup sur
tats obtenus. En effet, il a constaté par l'expérience que
en poudre et doux au toucher, comme l'or mussif, le
lombagine, la farine, la fleur de soufre, le charbon de
veloppent beaucoup d'électricité par le frottement.
éviter la déperdition de l'électricité du plateau par l'air,
quelquefois aux montants de bois deux quarts de cercle
s gommé, qui enveloppent le verre sur ses deux faces,

communiquer les conducteurs C avec le sol. Tourna
plateau, l'électricité positive des conducteurs se pe
tandis que l'électricité négative des coussins se ré
montants qui soutiennent le plateau. En effet, si l'o
main d'une boule métallique fixée au sommet des
des bandes d'étain O, on en tire des étincelles.

702. Tension maximum. — Même lorsqu'on obse
conditions que nous venons de faire connaître, la
machine a une limite qui ne peut être dépassée, qu
la vitesse de rotation du plateau et le temps pendan
tourne. Abstraction faite de toute déperdition, cette
teinte lorsque la tension sur les conducteurs fait éq
tion décomposante du plateau. Mais pratiquement l
machine ne s'élève jamais jusqu'à cette limite, à ca
ditions qui se produisent : 1° par l'air et la vape
contient; 2° par les supports; 3° par la recompositi
tion des deux électricités des coussins et du platea

On a déjà examiné les deux premières causes d
(690); pour nous rendre compte de la troisième, obs
tension sur le plateau croissant avec la rotation, il
ment où elle l'emporte sur la résistance que prése
l'écoulement de son électricité. A partir de cet ins
tion des électricités contraires développées sur le
coussins se recompose pour former de l'électricité
éviter cette cause de déperdition, il importe de faire

ctromètre de Henley. — La tension de l'électricité sur
ies électriques se mesure par l'*électromètre à ca-*
lectromètre de Henley. On nomme ainsi un petit pen-
ique consistant en une tige de bois *d* à laquelle est fixé
d'ivoire *c* (fig. 582). Au centre de ce dernier est un axe
quel tourne une aiguille de fanon de baleine terminée
nale de moelle de sureau *a*. L'instrument étant vissé
s conducteurs, à mesure que la
e charge, l'aiguille diverge et
monter quand le maximum de
t atteint. Si l'on cesse alors de
plateau, l'aiguille retombe rapi-
ns l'air humide; dans l'air sec
lombe que lentement, ce qui in-
la déperdition est faible.

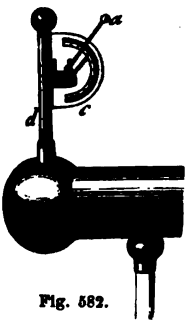


Fig. 582.

nducteurs secondaires. — On
nducteurs secondaires de gros
le cuivre, de fer-blanc ou de bois
d'étain, qu'on isole à l'aide de
erre ou en les suspendant à des
s soie, et qu'on met ensuite en
ation avec les conducteurs de la machine électrique. La
r laquelle s'accumule l'électricité se trouvant ainsi aug-
a tension ne croît pas; mais la quantité d'électricité
augmente, à tension égale, proportionnellement à la
n effet, lorsqu'on décharge alors la machine en la fai-
nuniquer avec le sol, on en tire des étincelles beaucoup
ses et produisant un vif éclat dans l'air.

achine de Nairne. — Nairne, en Angleterre, a imaginé,
it d'électriser les malades, une machine électrique qui
nom, et au moyen de laquelle on recueille à la fois les
ricités. Cette machine se compose de deux conducteurs
communiquant pas entre eux (fig. 583). L'un porte un
cuir C, et l'autre un peigne P. Entre les conducteurs
nchon de verre M, qu'on tourne avec une manivelle, et
ôté touche le frottoir, et de l'autre passe très-près du

on tourne le manchon, le frottoir C et le conducteur A
nt négativement, et le verre positivement. Or celui-ci,
les pointes du peigne, décompose son électricité neutre
l'électricité négative, d'où il résulte que le conducteur B
trisé positivement. Deux tiges D et E se terminent par
es de cuivre assez rapprochées pour qu'il en parte con-

Fig. 583 (h=70).

706. **Machine de Van Marum.** — A l'aide de cette
obtient à volonté l'une ou l'autre électricité. Elle se c

de cuivre au centre desquels est une pointe servant de peigne. Les arcs *a* et *d* sont toujours en croix, de façon que les peignes de l'un correspondant au plateau, ceux de l'autre correspondent aux coussins. Si ce sont les peignes de l'arc *d* qui correspondent aux coussins (fig. 584), une boule de cuivre A isolée, qui porte l'arc *d*, s'électrise négativement; si ce sont les peignes de l'arc *a* (fig. 585), la même boule A s'électrise positivement.

Les machines de Nairne et de Van Marum sont sans usage aujourd'hui, et ne mériteraient plus d'être données dans les cours à côté des machines nouvelles décrites ci-après (708).

707. **Machine hydro-électrique d'Armstrong.** — Dans cette machine, la production de l'électricité est due au dégagement de la

Fig. 586 (h=2m).

vapeur d'eau par de petits orifices. Cette machine a été inventée par M. Armstrong, physicien anglais, après la découverte d'un fait nouveau qui fut observé, en 1840, près de Newcastle, sur une chaudière de machine à vapeur. Une fuite s'étant déclarée à la soupape de sûreté, le chauffeur se trouvait avoir une main près du jet de vapeur, et allongeait l'autre pour saisir le levier

de la soupape, lorsqu'il reçut, au même moment, une forte commotion, et aperçut une vive étincelle entre le levier et sa main.

Informé de ce phénomène, M. Armstrong le reproduisit sur d'autres chaudières, et reconnut que la vapeur dégagée était chargée d'électricité positive. En expérimentant sur une locomotive qu'il avait isolée, il observa qu'elle s'électrisait négativement lorsqu'on soutirait par des pointes métalliques, à la vapeur d'eau qui s'échappait dans l'atmosphère, son électricité positive, et il obtint ainsi de très-fortes étincelles. C'est alors qu'il fit construire la machine représentée ci-dessus (fig. 586).

C'est une chaudière de tôle, à foyer intérieur, isolée sur quatre pieds de verre. Sa longueur est de près de $1^m,50$, et son diamètre de $0^m,60$. Un tube de cristal O, placé sur la droite de la chaudière et communiquant avec elle par les deux bouts, indique le niveau de l'eau à l'intérieur. Un manomètre à air comprimé, qui n'est pas représenté dans le dessin, marque la pression. Sur la chaudière est un robinet C, qu'on ouvre quand la vapeur a acquis une tension suffisante. Au-dessus de ce robinet est une boîte B dans laquelle circulent les tubes par lesquels se dégage la vapeur. Ces tubes sont terminés par des ajutages A représentés, à gauche du dessin, sur une plus grande échelle, par la coupe M. L'intérieur de ces ajutages est de bois dur et contourné, comme le montre la flèche, ce qui augmente le frottement. Enfin, la boîte B est remplie d'eau pour refroidir les tubes d'échappement. La vapeur, avant d'atteindre les ajutages de sortie, éprouve ainsi un commencement de condensation, et sort mélangée de vésicules d'eau, condition nécessaire; car, d'après les expériences de Faraday, il ne se dégage pas d'électricité par le passage de la vapeur *sèche*.

On avait d'abord attribué le développement de l'électricité, dans la machine hydro-électrique, à la condensation de la vapeur; mais d'après Faraday, qui a fait de nombreuses expériences sur cette machine, le développement de l'électricité est uniquement dû au frottement des globules d'eau contre la paroi des ajutages de sortie. En effet, les autres conditions restant les mêmes, si l'on change les cylindres de bois qui garnissent l'intérieur des tubes A, l'espèce d'électricité que prend la chaudière n'est plus la même; une garniture d'ivoire ne donne aucune trace d'électricité. La même chose a lieu si l'on introduit une matière grasse dans la chaudière, et les garnitures employées dans ce cas sont mises hors de service. Il n'y a dégagement d'électricité que lorsque l'eau est pure, et alors la chaudière est électrisée négativement et la vapeur positivement. Si l'on ajoute de l'essence de térébenthine, l'*effet* est inverse, c'est-à-dire que la vapeur s'électrise négative-

ıandière positivement. L'introduction d'une dissolu- : d'un acide fait cesser tout dégagement d'électricité. encore obtenu de l'électricité avec un courant d'air s avec l'air sec il n'y a aucun effet.

OUVELLES MACHINES ÉLECTRIQUES

ne électrique de Holtz. — Dans les machines décrites est au frottement qu'est due la production de l'élec- ment dû lui-même au mouvement engendré par le ique d'un moteur; ce qui montre que le mouvement, . vu se transformer en chaleur (405), peut aussi se en électricité.

ıformation est surtout apparente dans les machines ıns frottement que l'on construit depuis quelques an- nes dans lesquelles l'électricité est développée par n'exerce un corps électrisé fixe sur un corps en mou- machines de ce genre ont été construites, en 1865, st, à la même époque, par Holtz; mais, dès la fin du r, des machines électriques fondées sur le même ient été construites en Angleterre.

e de Holtz se compose de deux plateaux de verre ıts l'un de l'autre de 3 millimètres, et de diamètres 587). Le plus grand, AA, qui a 60 centimètres de dia- te, maintenu par quatre galets de bois *a* portés par les pieds de verre. En avant du plateau A est le se- ın diamètre de 55 centimètres seulement, et tournant horizontal de verre, qui traverse une ouverture cen- ée dans le grand plateau. Le plateau B est plein dans ndue, tandis que le plateau A est percé, suivant un tre, de deux grandes ouvertures, ou *fenêtres*, F, F'. ord inférieur de la fenêtre F, sur la face postérieure est collée une bande de papier *p*, et sur la face anté- nguette *n* de carton mince, réunie à la bande *p* par te de papier, qui passe par-dessus le bord de la fe- fenêtre F', le bord supérieur est armé de la même e bande de papier *p'* et d'une languette *n'*. Les bandes *p'* sont les *armures*. Les deux plateaux, les armures ıettes sont recouverts avec soin d'une couche de ver- ne laque, surtout les bords des languettes.

lu plateau B, à la hauteur des armures, sont deux ivre O, O', supportés par deux conducteurs de même ı leurs extrémités antérieures, ceux-ci se terminent

par deux boules assez grosses, que traversent deux tiges de c
vre terminées par deux boules r, r', et munies de poignées
bois K, K'. Ces tiges peuvent non-seulement glisser à frottem
doux dans les grosses boules, mais tourner avec elles, de mani
à être plus ou moins rapprochées et inclinées. La rotation
plateau B s'obtient à l'aide d'une manivelle M et d'une suite

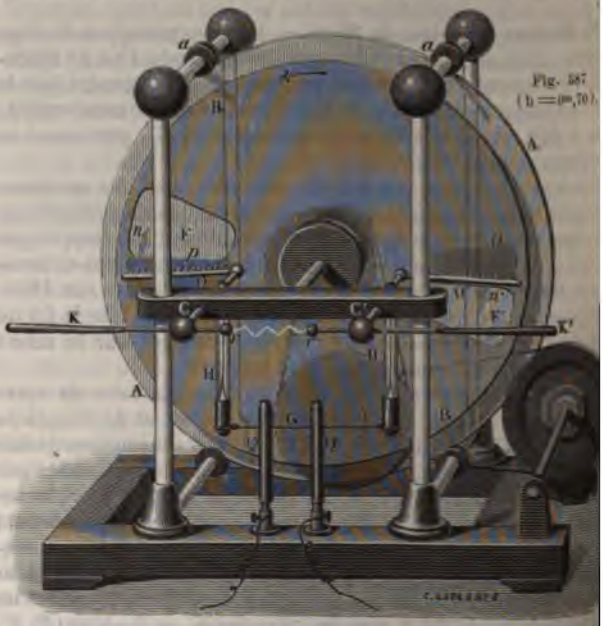


Fig. 587
(1) = 0m,70).

poulies et de courroies sans fin ; sa vitesse est de 12 à 15 t
par seconde, et la rotation doit avoir lieu dans le sens des
ches, c'est-à-dire vers les pointes des languettes n, n'.

Pour que la machine fonctionne, il ne suffit pas de faire tour
le plateau B, il faut commencer par *amorcer* les armures p,
c'est-à-dire par les électriser, l'une positivement, l'autre néga
vement. Pour cela, on fait usage d'une plaque de caoutchouc du
qu'on électrise en la frottant avec une peau de chat, ou avec
main ; puis, ayant mis en contact les boules r, r', on approche
plaque électrisée derrière une des armures, p par exemple, et
fait marcher le plateau B. La plaque de caoutchouc, chargée d
lectricité négative, agit par influence sur l'armure p, en décom

ose l'électricité neutre, et l'électricité négative repoussée se déchargeant par la languette *n* sur le plateau mobile B, l'armure se trouve chargée positivement. Après une demi-révolution, l'électricité négative du plateau, arrivant devant la fenêtre F', agit par influence sur l'armure *p'* pour la charger d'électricité négative, en en soutirant par la languette *n'* l'électricité positive. Après quelques instants de rotation, les deux armures se trouvant ainsi électrisées, l'une positivement, l'autre négativement, on supprime la plaque induisante de caoutchouc, et l'on écarte les boules *r*, *r'*, comme le montre le dessin. Continuant alors à faire tourner le plateau, un

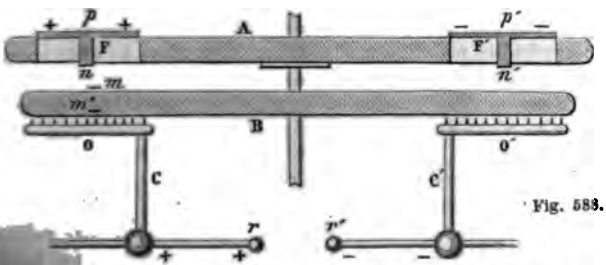


Fig. 588.

rent d'étincelles jaillit sans interruption d'une boule à l'autre. Pour mieux interpréter les effets de cette machine, soient, en projection horizontale (fig. 588), les détails de la figure 587, en conservant dans les deux figures les mêmes lettres. Une fois que les armures *p* et *p'* sont, comme on vient de le voir, électrisées l'une positivement, l'autre négativement, elles agissent par influence non-seulement sur le plateau tournant B, mais, à travers celui-ci, sur les peignes O, O' : *p*, qui est positif, électrise négativement par influence la portion *m* du plateau B, et soutire en même temps au peigne O son électricité négative, qui se dépose sur la portion *m'* du plateau B ; en sorte que celui-ci se trouve électrisé négativement sur ses deux faces en *m* et *m'*, tandis que le peigne O l'est positivement. Puis, la rotation continuant, *m*, *m'* arrivent devant la fenêtre F'. Là, la portion superficielle *m'*, opposant son influence à celle de l'armure négative *p'*, soutire du conducteur C'*r'* l'électricité positive, et le charge d'électricité négative, tandis que *m*, agissant par influence sur l'armure *p'*, en soutire l'électricité positive, et la maintient ainsi à l'état négatif. Les deux portions superficielles *m*, *m'*, alors ramenées à l'état neutre, vont passer de nouveau devant la fenêtre F, et la même série de phénomènes se continue.

Les plateaux d'égal diamètre, la machine de Holtz est beaucoup

plus puissante que la machine ordinaire. On augmente encore sa puissance en suspendant aux conducteurs C, C', deux *condensateurs* H, H' (fig. 587), qui consistent en deux éprouvettes de verre épais, dont les parois intérieures et extérieures sont recouvertes d'une feuille d'étain jusqu'à un cinquième de leur hauteur. Chaque éprouvette est fermée par un bouchon dans lequel passe une tige de cuivre à crochet, communiquant d'un bout à la feuille d'étain intérieure, et suspendue de l'autre à un des conducteurs. A l'extérieur, les deux feuilles d'étain sont en communication par un conducteur G. En réalité, ces éprouvettes ne sont autre chose que deux petites bouteilles de Leyde (721), se chargeant, l'une H, d'électricité positive à l'intérieur et négative à l'extérieur, l'autre H', d'électricité négative à l'intérieur et positive à l'extérieur. Se chargeant par l'intermédiaire de la machine, et se déchargeant sur fur et à mesure par les boules *r*, *r'*, elles renforcent l'étincelle, qui atteint alors jusqu'à 17 centimètres.

Pour utiliser le courant de la machine de Holtz, on dispose en avant du bâti deux bornes de laiton Q, Q', desquelles partent deux fils de cuivre; puis, au moyen des poignées K, K', on incline les tiges qui portent les boules *r*, *r'*, de manière à mettre celles-ci en contact avec les bornes. Dirigeant alors le courant par les fils, on charge en quelques secondes une batterie de six bocaux (723), on décompose l'eau, et l'on fait marcher le galvanomètre et les tubes de Geissler (897), comme avec la pile voltaïque.

La machine de Holtz est d'un petit volume, et demande, pour être mise en mouvement, moins de force que les machines à frottoirs. Toutefois, quand on fait tourner le plateau avant d'avoir électrisé les armures, puis lorsqu'elles le sont, on éprouve, dans le second cas, une résistance plus grande : c'est le travail mécanique déployé par l'opérateur qui est transformé en électricité.

709. **Machine diélectrique de Carré.** — M. F. Carré, à Paris, a imaginé récemment une machine à laquelle il donne le nom de *machine diélectrique*, et qui est une combinaison de l'ancienne machine à frottement et de la machine de Holtz.

Elle se compose de deux plateaux tournant en sens contraires, l'un A de verre, l'autre B de caoutchouc durci. Ils se recouvrent mutuellement des $\frac{2}{5}$ aux $\frac{3}{4}$ de leurs rayons (fig. 589). L'inférieur tourne lentement au moyen d'une manivelle M, tandis que le supérieur reçoit un mouvement de rotation rapide par une corde sans fin qui va d'une grande à une petite poulie.

Le plateau A, après s'être électrisé positivement entre deux frottoirs F, F', vient, à travers le plateau B, agir par induction sur le peigne *i*, et en soutirer l'électricité négative qui se rend sur

le conducteur *de* restant électrisé positivement. Or B tournant très-vite, son électricité négative va induire peigne *g*, dont elle soutire l'électrité positive; le pla- ent donc à l'état neutre, tandis que le conducteur C, en

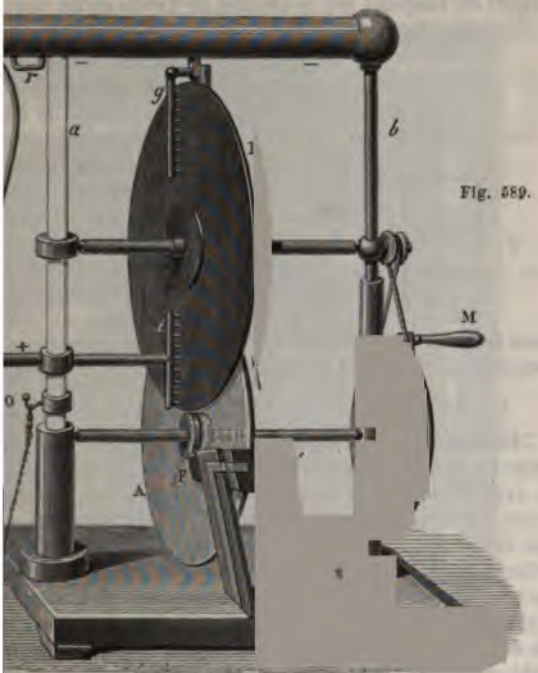


Fig. 589.

tion avec le peigne *g*, se charge d'électricité négative. cteur est porté par deux colonnes, l'une *a* de verre, caoutchouc durci. Une chaîne se rendant au sol est à un crochet métallique O qu'on élève à volonté pour n communication avec le peigne *i*. De plus, les frot- , le long des montants qui les portent, sont en com- avec la terre par deux bandes métalliques qui des- squ'au pied de la machine.

p (fig. 590) est un secteur de papier verni, taillé en peigne et collé sur un segment isolant P, de même i servant de support. Des dents du secteur *p* s'écoule, s brillantes, de l'électricité positive sur le plateau B à

mesure qu'il avance, et par induction ce secteur *p* fo
peigne *g* un surcroît d'électricité négative. Enfin, la tig
boule *e* s'éloignent à volonté du conducteur C (fig. 589)
tirer des étincelles plus ou moins longues. En *r* est u
auquel on suspend les bouteilles de Leyde qu'on veut c

Par suite de l'action immédiate et au maximum de
plateau inducteur, l
de M. Carré est pe
à l'humidité de l'ai
nit un dégagement
d'électricité de ten
des plateaux dont l
sions respectives so
de 49 centimètres,
des étincelles de 1
timètres, et plus,
ajoute un condensat

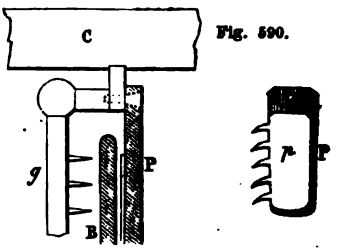


Fig. 590.

dans la machine de Holtz. Enfin, elle peut illuminer d
Geissler de plusieurs mètres de longueur.

EXPÉRIENCES AVEC LES MACHINES ÉLECTRI

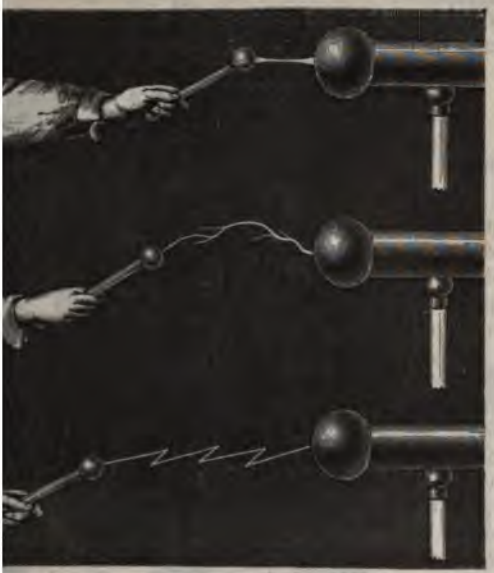
710. **Étincelle électrique.** — Un des premiers phénom
observe lorsqu'on expérimente avec une machine élec
la vive étincelle qu'on tire des conducteurs en app
main. On a déjà vu que la cause de ce phénomène
par influence qu'exerce l'électricité positive de la m
l'électricité neutre de la main. Cette électricité étant dé
l'attraction entre les électricités contraires de la machi
main finit par l'emporter sur la résistance de l'air; à c
les deux électricités se recomposent avec bruit et lumi
celle apparaît vive, instantanée, et accompagnée d'
plus ou moins forte, selon la puissance de la machin

La forme de l'étincelle est variable. Si elle éclate à
distance, elle est rectiligne (fig. 591). Au delà de 6 à 7 c
de longueur, l'étincelle devient irrégulière et présent
d'une courbe sinueuse, accompagnée de ramifications t
(fig. 592). Enfin, si la décharge est très-forte, l'étincell
forme en zigzag (fig. 593). Ce sont les deux dernières f
présentent les éclairs dans les nuées orageuses.

711. **Durée de l'étincelle électrique.** — Wheatstone,
terre, avait déjà cherché à rendre appréciable la durée
celle électrique par la méthode du miroir tournant em
Foucault à la recherche de la vitesse de la lumière (

é qu'avec une vitesse de rotation suffisante, les étin-
ient des images allongées dans le sens de la rotation,
ait la durée de l'étincelle appréciable.

, Arago, en France, pour rendre sensible la durée des



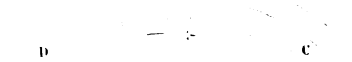
591.

592.

593.

isage d'un disque métalliqne tournant autour d'un
iculaire à son plan. Ce disque était divisé, dans le
ons et à des intervalles égaux, par des ouvertures lon-
très-étroites qui laissaient passer la lumière. En re-
clairs à travers ce disque animé d'une vitesse de ro-
e, les traits paraissaient d'autant plus larges, que la
clair était plus grande.

MM. Lucas et Cazin ont adopté une méthode plus
e du chronoscope à étincelles électriques, qui per-
urer la durée de l'étincelle en millionièmes de se-
nstrument est une application du vernier. Un disque
0m,15 de diamètre, est noirci sur une de ses faces,
ontour sont tracées 180 divisions égales, en traits
très-fins. Le disque est monté sur un axe horizon-
it d'une machine à gaz, à l'aide d'un système d'en-



visions du disqu
comme le mo
594 ; d'où le v
les sixièmes d
disque de mica (12). Dans l'appareil, les traits A
au-dessus des traits CD, mais à la même distanc
manière que les derniers viennent successivement
les premiers.

Fig. 594.

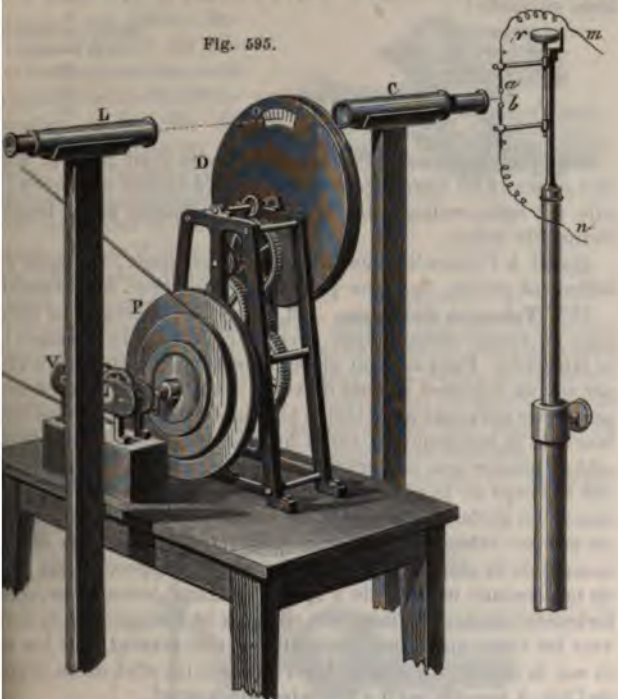
Le disque de mica est renfermé dans une cais
(fig. 595), dont la face postérieure, qui est fixe, po
La face antérieure est percée d'une fenêtre O, f
glace de verre, à travers laquelle on observe les co
traits du vernier et du disque avec une lunette gro

La source électrique est une batterie de 1 à 9
ayant chacune 1 243 centimètres carrés de surface
chargées d'une manière continue par une machine
étincelles éclatent entre deux boules de métal *a* et
mètres de diamètre. On fait varier la distance de
une vis de rappel dont le bouton *r* est gradué de
micromètre. Les deux électricités contraires arriv
par les fils *m* et *n*, et les étincelles éclatent au
d'une lentille convergente placée dans le tube C,
parallèle le faisceau qui tombe sur le vernier.

Enfin, le mouvement est transmis aux engrenage
de mica par une courroie sans fin qu'on fait pa

ble que lorsqu'il y a coïncidence entre un trait du disque et des six traits du vernier, et celui-ci donnant les sixièmes de sion du disque mobile, lorsque ce dernier a tourné de $\frac{1}{6}$ de

Fig. 595.



ion, une deuxième coïncidence se produit; d'où l'intervalle deux coïncidences consécutives est $\frac{1}{12\,000 \times 6} = 0{,}000\,002\,3$ conde.

a posé, soit la durée de l'étincelle comprise entre 23 et 46 illionièmes de seconde; si elle éclate à l'instant d'une coïn-ce, elle durera encore à la coïncidence suivante, et à cause persistance de l'impression sur la rétine (598), l'observa-erra deux traits lumineux. Mais si l'étincelle éclate entre coïncidences, et a cessé quand se produit la troisième, on qu'un trait brillant. Donc, lorsqu'avec la vitesse ci-des-voit tantôt 1, tantôt 2 traits brillants, la durée de l'étin-st comprise entre 23 et 46 dix millionièmes de seconde.

D'où l'on voit que la durée de l'étincelle croît a
des jarres. Elle augmente aussi avec la distance e
elle est indépendante du diamètre des boules e
l'étincelle éclate.

Quant à l'étincelle des machines électriques,
tellement petite, qu'on ne peut l'apprécier avec l

712. **Tabouret électrique.** — L'étincelle électriq
sous un aspect remarquable, lorsque c'est du corp
la fait jaillir. Pour cela on place la personne qu'il
ser sur un tabouret à pieds de verre, nommé *tabo*
puis cette personne ainsi isolée pose une main sur l
teurs de la machine. Le corps humain conduisan
cité, à mesure que la machine se charge, l'électric
sur le corps de la personne en même temps que
teurs; en sorte que, si on la touche sur les main
ou sur les vêtements, on tire de cette personne
comme de la machine même. Tant qu'on n'approc
de la personne isolée, elle n'éprouve aucune comm
fortement électrisée; mais ses cheveux se hérisser
vers les corps qu'on leur présente, et elle ressent
et sur la figure, un souffle léger, qui est un effet
de l'air, à mesure qu'il s'électrise par contact.

On peut encore électriser une personne isolée s
pieds de verre en la battant avec une peau de c
alors le pendule électrique et donne des étincell

ı métalliques qui établissent la communication tandis que le timbre du milieu pend par un fil de de la machine ; mais il communique avec le sol chaîne. En-
ıbre du mi-
autres, sont
les de cuivre
les fils de
charge la
imbres A et
ositivement,
es et les re-
ı'il y a eu
ı-ci, se trou-
isées positi-

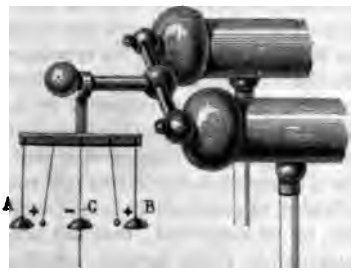


Fig. 596.

nt vers le timbre C, qui, quoique en communica-
, est chargé d'électricité négative par l'influence
Aussitôt après le contact, les boules sont donc re-
ı timbres A et B, et exécutent un mouvement de
le et des chocs successifs qui font résonner les
ıt le temps que la machine est chargée.
r comment les grêlons peuvent souvent atteindre

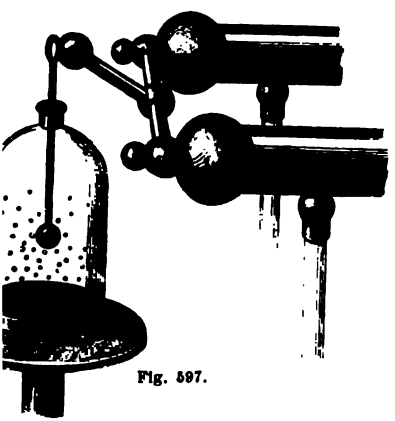


Fig. 597.

dérable avant de tomber, Volta a imaginé un ap-
ıme le précédent, sur les attractions et les répul-
. Cet appareil consiste en une cloche de verre pla-
ıu de cuivre dans lequel on met de petites boules

de moelle de sureau (fig. 597). Dans le goulot de la cloche passe, à frottement doux, une tige de cuivre terminée à la partie inférieure par une boule de même métal, et communiquant par son extrémité supérieure avec la machine électrique. Aussitôt que celle-ci se charge, la boule qui est dans l'appareil s'électrise, attire les balles de sureau et les repousse ensuite, en sorte qu'elles s'agitent avec une grande vitesse, allant du plateau à la boule et de la boule au plateau, et cédant à ce dernier l'électricité qu'elles ont prise à la boule. Se fondant sur cette expérience, Volta admettait que, lorsque les grêlons se trouvent placés entre deux nuages chargés d'électricités contraires, ils vont ainsi successivement de l'un à l'autre, et condensent, à leur surface, la vapeur d'eau ambiante, qui, en se congelant, leur fait acquérir le volume qu'on observe quelquefois. Cette théorie, insuffisante pour rendre compte de la grosseur des grêlons, n'est point admise aujourd'hui.

714. **Tourniquet électrique, insufflation.** — On nomme *tourniquet électrique* un petit appareil composé de cinq ou six rayons métalliques recourbés tous dans le même sens, terminés en pointe et fixés à une chape commune, mobile sur un pivot (fig. 598). Cet appareil étant posé sur la machine électrique, aussitôt que celle-ci se charge, les rayons et la chape prennent un mouvement de rotation rapide dans la direction opposée aux pointes. Ce mouvement n'est point un effet de réaction comparable à celui du tourniquet hydraulique (86), comme l'ont admis plusieurs physiciens : c'est un effet de répulsion entre l'électricité des pointes et celle qu'elles communiquent à l'air.

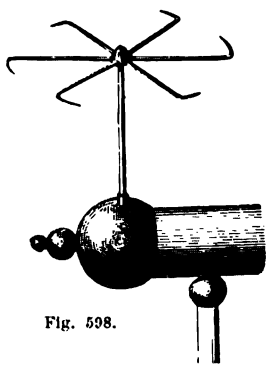


Fig. 598.

L'électricité, s'accumulant vers les pointes, s'écoule dans l'air, et comme celui-ci se trouve chargé de la même électricité que les pointes, il les repousse en même temps qu'il en est repoussé lui-même. On reconnaît, en effet, que le tourniquet n'entre point en mouvement dans le vide, et si l'on approche la main tandis qu'il tourne dans l'air, on ressent un souffle léger, dû au déplacement de l'air électrisé.

Quand l'électricité s'écoule ainsi par une pointe, l'air électrisé est assez fortement repoussé pour donner naissance à un courant qui non-seulement est sensible à la main, mais souffle et peut même éteindre la flamme d'une bougie, du moins avec une puis-

nte machine électrique. La figure 599 montre comment se dis-
se cette expérience. On obtient le même effet en posant la
agie sur l'un des conducteurs et en lui présentant une pointe

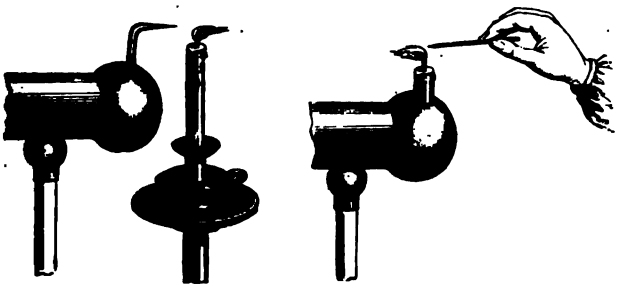


Fig. 599. Fig. 600.

étallique qu'on tient à la main (fig. 600). Le courant provient,
ns ce dernier cas, de l'électricité contraire qui se dégage de la
inte par l'influence de la machine.

715. Poisson volant de Franklin. — Le *poisson volant*, ou *tom-
ns de Mahomet*, est une expérience faite pour la première fois
r Franklin, laquelle consiste
faire tenir un corps léger en
uilibre au milieu de l'atmo-
hère, sous l'influence des at-
ction et répulsion combinées
n corps électrisé. Pour faire
tte expérience, on découpe une
ille de papier argenté, ou sim-
ment de papier à lettre, sous

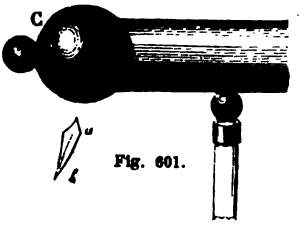


Fig. 601.

forme *ab* (fig. 601); puis, tenant le papier par la pointe effilée,
le présente au conducteur d'une machine électrique en acti-
té. Abandonnant alors le *poisson* à lui-même, il reste suspendu
dessous du conducteur dans une immobilité presque complète.
e conducteur est, par exemple, électrisé positivement, son
ectricité, décomposant sans cesse l'électricité neutre du poisson,
ire en *a* l'électricité négative, et repousse en *b* l'électricité po-
ive, lesquelles s'écoulent par les pointes. De là une attraction
une répulsion dont la différence doit évidemment égaler le poids
papier pour qu'il y ait équilibre.

Pour expliquer comment cet équilibre est stable, M. Gaugain,
expérimentant sur de grands poissons métalliques, a constaté
e, lorsque le poisson est déplacé par une cause quelconque,

non-seulement le flux électrique, aux deux extrémités, varie d'intensité, mais que la distribution et la grandeur relative des charges se modifient également : quand le poisson se rapproche du conducteur, la charge négative se resserre de plus en plus, tandis que la charge positive s'étend; en sorte qu'à une certaine distance, la charge négative l'emporte sur la charge positive, à une distance moindre les deux charges sont égales, et enfin, la distance décroissant encore, c'est la charge positive qui prédomine. Par suite, la répulsion augmentant quand le poisson s'approche, il tend aussitôt à s'éloigner; puis, la force attractive croissant lorsque la distance augmente, le poisson tend de nouveau à s'approcher. De là un état d'équilibre qui, dans de certaines limites, est stable.

Riess explique simplement le phénomène du poisson volant en en donnant pour cause le vent électrique (714) qui, s'échappant des deux pointes, produit deux répulsions opposées qui se font équilibre entre elles et au poids du corps.

CHAPITRE IV

CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ

716. **Condensateurs, leur théorie.** — On donne le nom général de *condensateurs* à des appareils qui servent à accumuler, sur des surfaces relativement petites, des quantités considérables d'électricité. On en a construit de diverses sortes, tous fondés sur le principe de l'électrisation par influence (692), et se composant essentiellement de deux corps conducteurs séparés par un corps non conducteur. Nous décrirons d'abord le *condensateur d'Æpinus.*

Cet appareil se compose de deux plateaux circulaires de cuivre A et B (fig. 602), et d'une lame de verre C qui les sépare. Ces plateaux, munis chacun d'un petit pendule électrique, sont isolés sur deux colonnes de verre, et les pieds de celles-ci peuvent être déplacés le long d'une règle qui leur sert de support, de manière à écarter ou à rapprocher à volonté les deux plateaux. Lorsqu'on veut accumuler les deux électricités sur les plateaux, on les met en contact avec la lame de verre (fig. 603); puis, au moyen de cordons métalliques, on fait communiquer l'un d'eux, B par exemple, avec la machine électrique, et l'autre avec le sol.

Pour nous rendre compte comment l'électricité s'accumule dans cet appareil, appelons, sur les deux plateaux, faces *antérieures*

celles qui regardent la lame de verre, et faces *postérieures* celles qui lui sont opposées. De plus, supposons d'abord le plateau A assez éloigné du plateau *collecteur* B pour n'en recevoir aucune influence. Dans ce cas, le plateau B, mis en communication avec la machine électrique, prend une tension maximum égale à celle de la machine, laquelle se distribue également sur ses deux faces,

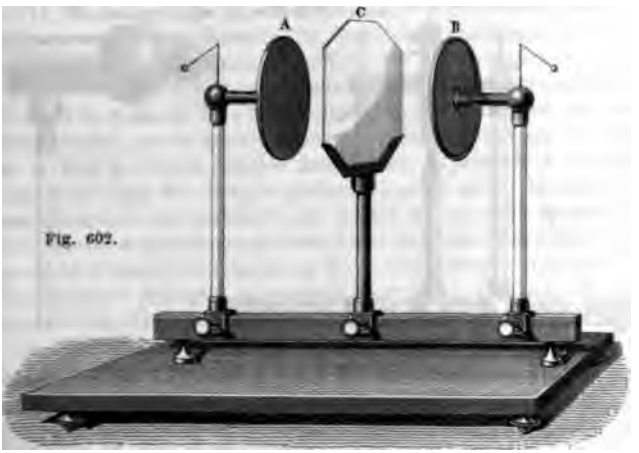


Fig. 602.

et le pendule *b* diverge fortement. Si l'on supprime alors la communication avec la machine, rien n'est changé; mais qu'on approche lentement le plateau A, son électricité neutre étant décomposée par l'influence de B, l'électricité négative se porte sur la face antérieure *n* (fig. 604), et la positive s'écoule dans le sol. Or, l'électricité négative du plateau A réagissant à son tour sur l'électricité positive du plateau B, l'électricité de celui-ci cesse d'être également distribuée sur ses deux faces et se rend en partie sur la face antérieure *m*. L'électricité du plateau B et de son support s'étant ainsi portée en *m*, le pendule *b* s'abaisse, ce qui fait voir que la tension a diminué sur la face *p*. Par suite, si l'on reçoit la communication avec la machine rétablie, la tension sur celle-ci l'emporte sur la tension en *p*, et une nouvelle quantité d'électricité passe sur le plateau B, où, agissant comme ci-dessus, elle décompose par influence une deuxième quantité d'électricité neutre sur le plateau A. De là, nouvelle accumulation d'électricité négative sur la face *n*, et, par suite, d'électricité positive sur la face *m*. Or chaque fois que la machine cède de

l'électricité au plateau collecteur, une partie seulement de cette électricité passant sur la face *m*, et l'autre restant sur la face *p*, la tension sur celle-ci va toujours croissant, jusqu'à ce qu'elle égale de nouveau celle de la machine. A partir de là, l'équilibre s'établit, et l'on est arrivé à une limite qui ne peut être dépassée.

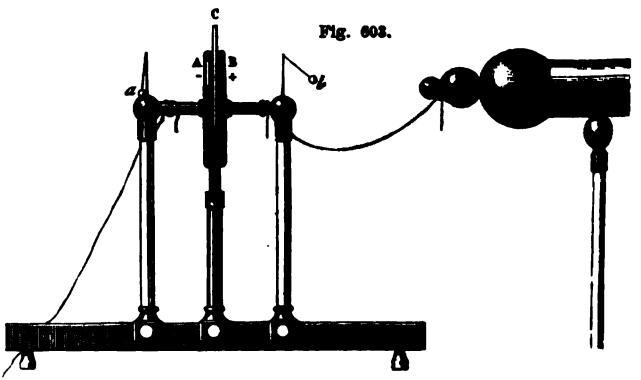


Fig. 603.

L'électricité accumulée sur les deux faces *m* et *n* est maintenant très-considérable, cependant le pendule *b* diverge juste autant que lorsque le plateau A était éloigné; c'est qu'en effet la tension en *p* est précisément la même qu'elle était alors : celle de la machine. Quant au pendule *a*, sa divergence est nulle.

Lorsque le condensateur est chargé, c'est-à-dire lorsque les électricités contraires sont accumulées sur les faces antérieures, on rompt les communications avec la machine et avec le sol, en enlevant les deux chaînes métalliques. D'après ce qui a été dit ci-dessus, le plateau A est chargé d'électricité négative sur sa face antérieure *n* seulement (fig. 604), et l'autre face est à l'état neutre. Au contraire, le plateau B est électrisé positivement sur ses deux faces, mais inégalement : l'accumulation ayant lieu sur la face antérieure, tandis que sur la postérieure *p* la tension égale seulement celle de la machine au moment où l'on a rompu les communications. L'excès d'électricité qui recouvre alors la face *p*, n'étant pas retenue par celle du plateau A, est prête à

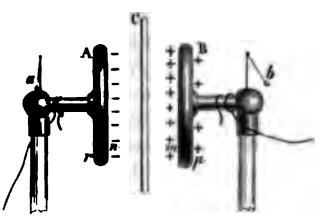


Fig. 604.

se dégager aussitôt qu'on lui présente un conducteur, ce qu'on exprime en disant qu'elle est *libre*. En effet, pendant que le pendule *a* reste vertical, le pendule *b* diverge. Mais si l'on écarte les deux plateaux, on voit les deux pendules diverger (fig. 602); ce qui résulte de ce que les électricités contraires, n'agissant plus d'un plateau à l'autre, se distribuent également, l'une sur le plateau A, l'autre sur le plateau B, et sur leurs supports.

717. **Décharge lente du condensateur.** — Les plateaux étant en contact avec la lame isolante (fig. 603), et les chaînes enlevées, on peut décharger le condensateur par une décharge lente, ou instantanée. Pour le décharger lentement, on touche avec le doigt d'abord le plateau B, c'est-à-dire celui qui contient un excès d'électricité; on en tire alors une étincelle, et, l'électricité libre de la face *p* s'étant écoulée dans le sol, le pendule *b* retombe, mais *a* diverge. En effet, le plateau B, ayant perdu une partie de son électricité, ne conserve sur la face *m* que celle retenue par l'électricité négative du plateau A. Or, à cause de la distance, la quantité d'électricité retenue en B est moindre que celle de A; ce qui explique pourquoi le pendule *a* se met à diverger, et pourquoi, si l'on touche actuellement le plateau A, on en tire une étincelle, qui fait retomber le pendule *a* et diverger *b;* et ainsi de suite, en continuant à toucher alternativement les deux plateaux. La décharge ne s'opère ainsi que très-lentement, et, si l'air est sec, elle exige plusieurs heures. Théoriquement, dans un air parfaitement sec, et abstraction faite de toute déperdition, il faudrait un nombre de contacts infini. Si l'on touchait d'abord le plateau A, qui est le moins électrisé, on ne lui enlèverait point d'électricité, puisque toute celle qu'il possède est retenue par l'électricité de B.

718. **Décharge instantanée et décharge secondaire.** — Lorsqu'on veut décharger instantanément le condensateur, on met en communication les deux plateaux au moyen d'un *excitateur*. On nomme ainsi un système de deux arcs de laiton, terminés par des boules de même métal et réunis par une charnière. Quand les arcs sont munis de manches isolants de verre (fig. 605), l'appareil prend le nom d'*excitateur à manches de verre;* s'ils n'ont pas de manches (fig. 608), on lui donne le nom d'*excitateur simple*. Pour faire usage de l'excitateur, on applique l'une de ses boules sur un des deux plateaux du condensateur, et l'on approche l'autre boule du second plateau; il jaillit alors une forte étincelle qui provient de la recomposition des électricités contraires accumulées sur les deux faces du condensateur; c'est la *décharge instantanée*.

Toutefois, après cette étincelle, le condensateur n'est jamais

complétement déchargé; car on peut encore, surtout si on écouler un court intervalle, en tirer de la même manièr deuxième, une troisième étincelle, et même davantage, m plus en plus faibles. Ces décharges s sives se désignent sous le nom de d *ges secondaires*.

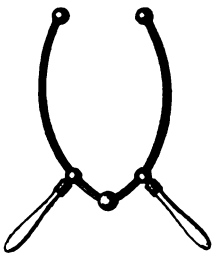


Fig. 605.

Elles ont pour cause une électrisat influence qui s'est développée lente à une faible profondeur sur les deu du verre (692); puis, lorsque les pl ont été déchargés, c'est l'électric verre qui les électrise de nouveau.

Si, au lieu de faire communiq plateaux du condensateur au mo l'excitateur, on touche d'une main plateaux, et de l'autre main le second plateau, la recomp s'opère par les bras et par le corps, et l'on ressent alors u motion d'autant plus vive, que la surface du condensat plus grande et la charge électrique plus forte.

719. **Limite de charge des condensateurs.** — La quantité tricité qui peut s'accumuler sur chaque face du condensat toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la tensio source et à la surface des plateaux; mais elle décroît quand seur de la lame isolante augmente. Dans tous les cas, deux limitent la quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur l du condensateur. La première, c'est que l'électricité libre plateau collecteur croissant graduellement, la tension sur teau finit par égaler la tension sur la machine, et, à parti moment, celle-ci ne peut rien céder au condensateur (71

La deuxième cause est la résistance limitée que présen recombinaison des deux électricités la lame isolante placé les deux plateaux; en effet, lorsque la tension des élec pour se recombiner l'emporte sur la résistance de cette lam est trouée, et les électricités contraires se réunissent.

720. **Force condensante.** — On nomme *force condensante* le rapp la charge totale que prend le plateau collecteur quand il est influen second plateau, à celle qu'il recevrait s'il était seul; ou, ce qui revient a le rapport entre la quantité totale d'électricité du plateau collecteur à s'y trouve libre; car on a vu que l'électricité qui reste libre sur le pla lecteur est précisément celle qu'il prend étant seul (716).

Pour calculer la force condensante, soient P la quantité totale d'é positive sur le plateau collecteur, N la quantité totale d'électricité nég le second plateau, et a l'électricité libre sur le premier, on a $N = mP$ [1] une fraction dont la valeur est d'autant plus voisine de l'unité, que la l *lante* entre les deux plateaux est plus mince. Or, si l'on touche le platea

r, on lui enlève son électricité libre a. Les rôles sont donc changés, c'est le nd plateau dont la charge est actuellement la plus grande, mais dans un part encore égal à m, la lame isolante étant la même : c'est-à-dire qu'on a

$$P - a = mN\,[2], \quad \text{ou} \quad P - a = m^2P\,[3],$$

remplaçant N par sa valeur donnée par l'égalité [1]. De l'égalité [3] on tire

$$\frac{P}{a} = \frac{1}{1 - m^2},$$

part qui n'est autre chose que la force condensante cherchée. Quant à la ur de m, elle se détermine par l'expérience, à l'aide du plan d'épreuve et la balance de torsion. D'après la formule ci-dessus, la force condensante est tant plus grande, que la valeur de m approche davantage de l'unité.

521. Carreau fulminant. — Le *carreau fulminant* est un conteur plus simple que celui d'Æpinus, et plus propre à donner

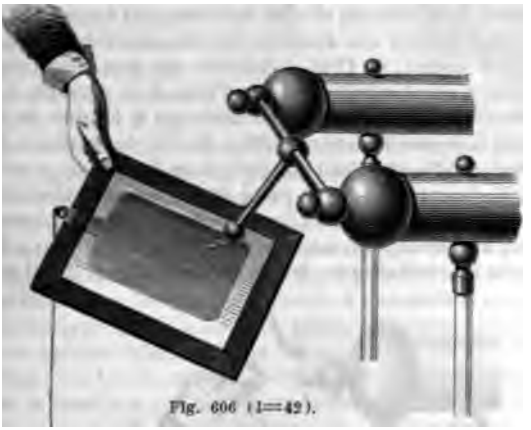


Fig. 606 (1=42).

rives étincelles et de fortes commotions. Il est formé d'un car- de verre ordinaire entouré d'un cadre de bois. Sur les faces carreau sont collées deux feuilles d'étain en regard l'une de tre, et laissant entre leurs bords et le cadre un intervalle de ntimètres environ. Ces feuilles ne communiquent pas entre s; mais l'une d'elles communique avec le cadre par un petit m d'étain qui se replie (fig. 606) de manière à être en contact um anneau auquel est suspendue une chaîne. Pour charger rreau fulminant, on présente à la machine électrique la feuille in isolée, c'est-à-dire celle qui ne communique pas au cadre. me l'autre est mise, par la chaîne, en communication avec le les deux feuilles se comportent comme les plateaux du con- teur d'Æpinus, et il s'accumule sur l'une et sur l'autre une de quantité d'électricités contraires.

Le carreau fulminant se décharge, comme le condensateur d'Æpinus, avec l'excitateur simple. Tenant le carreau à la main, on applique une des boules de l'excitateur sur l'extrémité de la petite bande d'étain qui appartient à la feuille inférieure; puis on approche l'autre boule de la feuille supérieure. Il jaillit alors une vive et bruyante étincelle, mais sans que l'expérimentateur ressente la moindre commotion, car la recomposition s'opère tout entière par l'arc métallique. Si, au contraire, tenant toujours l'appareil de la même manière, on touche en même temps les deux feuilles d'étain avec les mains, on reçoit une forte commotion, car la recomposition électrique s'opère par les bras et par le corps.

722. **Bouteille de Leyde.** — La *bouteille de Leyde*, ainsi appelée du nom de la ville où elle fut inventée, est due au Hollandais Musschenbroek (les uns disent à Cuneus, son élève), qui la découvrit par hasard, en 1746. Ayant fixé une tige métallique dans le bouchon d'une bouteille remplie d'eau, il la présenta à la machine électrique dans l'intention d'électriser le liquide. Or la main qui tenait la bouteille faisant l'office de l'un des plateaux du condensateur, tandis que l'eau qui était dans l'intérieur représentait l'autre, il s'accumula, sur la paroi intérieure, de l'électricité positive, et, sur la portion de la paroi extérieure en contact avec la main, de l'électricité négative. En effet, ayant approché une main de la tige métallique, tandis que de l'autre il tenait toujours

Fig. 607.

la bouteille, Musschenbroek reçut, dans les bras et dans la poitrine, une commotion tellement forte, qu'il écrivait à Réaumur qu'il ne recommencerait pas pour le royaume de France.

Cependant, cette expérience une fois connue, on s'empressa de toutes parts de la répéter. L'abbé Nollet, professeur à Paris, remplaça, le premier, l'eau qui était dans la bouteille par des feuilles chiffonnées d'étain, de cuivre ou d'or. Déjà un physicien anglais avait reconnu qu'en recouvrant l'extérieur de la bouteille d'une

ille d'étain, les commotions étaient beaucoup plus vives. La teille de Leyde prit donc peu à peu la forme qu'on lui donne ourd'hui, mais on en ignorait la théorie; c'est Franklin qui la onnaître, en faisant voir que la bouteille de Leyde est, ainsi le carreau fulmi- t, un véritable con- ateur.

Fig. 608.

a bouteille de Leyde ompose d'un flacon de re mince dont la gran- rvarie suivant la quan- d'électricité qu'on t accumuler. L'inté- ur est rempli de feuil- d'or battu. Sur la pa- extérieure est collée feuille d'étain B qui uvre aussi le fond, mais qui doit laisser le verre à nu jusqu'à assez grande distance du goulot (fig. 607). On adapte au col bouchon de liége dans lequel passe, à frottement dur, une de cuivre recourbée en forme de crochet, et terminée par un ton A; à l'intérieur, cette tige communique avec les feuilles qui remplissent la bouteille. Ces feuilles constituent l'*ar- ture intérieure*, et la feuille d'étain B l'*armature extérieure*. a bouteille de Leyde se charge, comme le condensateur d'Æpi- et le carreau fulminant, en faisant communiquer l'une des atures avec le sol, et l'autre avec une source électrique. Pour , on la tient à la main par l'armature extérieure, et l'on pré te l'armature intérieure à la machine électrique : l'électricité itive s'accumule alors sur les feuilles d'or, et l'électricité né- ve sur l'étain. C'est le contraire qui aurait lieu si, tenant la teille par le crochet, on présentait l'armature extérieure à la hine. Du reste, la théorie de la bouteille de Leyde est identi- ment celle qui a été donnée pour le condensateur, et tout ce a été dit de celui-ci (716) s'applique à la bouteille, en substi- t ses deux armatures aux plateaux A et B de la figure 603. omme le condensateur, elle se décharge lentement ou instan- ment. Pour la décharger instantanément, on la tient à la main, on met en communication les deux armatures à l'aide de l'ex- teur simple, en ayant soin de toucher *d'abord* l'armature qu'on t à la main, sinon on reçoit la commotion (fig. 608). Pour la harger lentement, on l'isole sur un gâteau de résine, et l'on he alternativement, avec la main ou avec une tige de métal,

l'armature intérieure, puis l'armature extérieure, et ainsi de suite, tirant à chaque contact une étincelle faible.

Pour rendre plus sensible la décharge lente, on dispose la bouteille de Leyde comme le représente la figure 609. La tige est droite et munie d'un timbre *d*; près de la bouteille est une tige métallique portant un timbre *e* semblable au premier, et un pendule électrique formé d'une boule de cuivre suspendue à un fil de soie. La bouteille n'étant point fixée à la planchette *m*, on la prend à la main par l'armature extérieure, et on la charge en la présentant à la machine électrique; puis on la remet sur la planchette. L'armature intérieure contenant alors un excès d'électricité positive non neutralisée, le pendule est attiré et vient heurter le timbre de la bouteille; repoussé aussitôt, il va choquer le timbre *e* et lui cède son électricité; mais revenu à l'état neutre, il est attiré de nouveau par le timbre *d*, et ainsi de suite pendant plusieurs heures, si l'air est sec et la bouteille un peu grande.

Fig. 609.

723. **Bouteille à armatures mobiles.** — La *bouteille à armatures mobiles* sert à démontrer que dans la bouteille de Leyde, comme

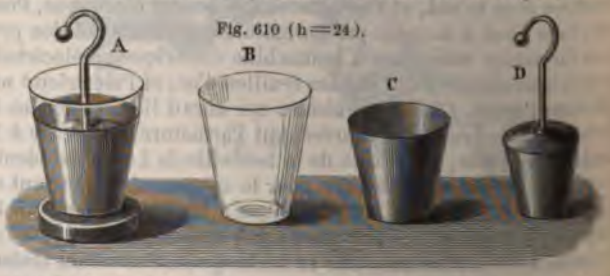


Fig. 610 (h=24).

dans tous les condensateurs, ce ne sont pas seulement les deux armatures qui sont électrisées, mais aussi les faces du verre qui les sépare. Cette bouteille, dont les différentes pièces peuvent se séparer, se compose d'un vase conique de verre B (fig. 610), d'une armature extérieure de fer-blanc C, et d'une armature intérieure de même matière D. Ces pièces, placées les unes dans

autres (fig. A), constituent une bouteille de Leyde complète. rès l'avoir électrisée comme la bouteille ordinaire et isolée un gâteau de résine, on enlève l'armature intérieure, ensuite vase de verre, puis l'armature extérieure, et l'on dispose ces ces les unes à côté des autres, comme le représente le dessin. les deux armatures sont évidemment ramenées ainsi à l'état itre. Cependant, si, remettant l'armature C sur le gâteau de ine, on place dedans le vase de verre, et dans celui-ci l'arma- e D, on reconstitue une bouteille de Leyde qui donne une étin- le presque aussi forte que si l'on n'avait pas déchargé les deux natures.

Cette seconde étincelle est une décharge secondaire, comme on déjà vu en parlant du condensateur d'Æpinus, et elle s'explique ntiquement de la même manière (718).

24. Jarres et batteries électriques. — Une *jarre* est une grande iteille de Leyde à goulot assez large pour qu'on puisse coller sa paroi interne une feuille d'étain qui sert d'armature inté- ure. La tige qui traverse le bouchon est droite et terminée, à la tie inférieure, par une chaîne métallique qui la met en commu- ation avec la feuille d'étain formant l'armature intérieure.

Une *batterie* est une réunion de plusieurs jarres placées dans

Fig. 611.

caisse de bois (fig. 611), et communiquant ensemble, à l'in- ieur, au moyen de tiges de métal, et extérieurement par une ille d'étain qui revêt le fond de la caisse et se trouve en contact c les armatures extérieures des jarres. Cette feuille se prolonge

latéralement jusqu'à la rencontre de deux poignées métalliques fixées sur les parois de la caisse. La batterie se charge en faisant communiquer les armatures intérieures avec la machine électrique, et les armatures extérieures avec le sol par le bois même de la caisse et de la table sur laquelle elle est placée, ou mieux par une chaîne fixée à l'une des poignées de la caisse. Un électromètre à cadran, placé sur l'une des jarres, indique la charge. Malgré la grande quantité d'électricité accumulée dans l'appareil, l'électromètre ne diverge que lentement et d'un petit nombre de degrés, ce qui ne doit pas étonner, car la divergence n'a lieu qu'en vertu de la différence de tension entre les armatures. Le nombre des jarres est, en général, de quatre, six ou neuf. Plus elles sont grandes et nombreuses, plus il faut de temps pour charger la batterie, mais plus ses effets sont puissants.

Pour décharger une batterie, on fait communiquer entre elles les

Fig. 612.

deux armatures au moyen de l'excitateur, en ayant soin de toucher d'abord l'armature extérieure. On doit faire usage ici de l'excitateur à manches de verre, et prendre toutes les précautions

iter la commotion; car, avec une forte batterie, elle peut
r des accidents graves, et même la mort.
d on veut foudroyer un animal, un objet quelconque, on
ge de l'*excitateur universel* dessiné sur le premier plan
ure 612. C'est une petite caisse de bois portant deux co-
le verre sur lesquelles sont fixées à charnière des tiges de
Entre ces colonnes est un pied de bois qui porte un petit
où se place l'objet ou l'animal sur lequel on veut expéri-
. Les deux tiges de cuivre étant dirigées vers cet objet, on
mmuniquer l'une d'elles avec l'armature extérieure de la
, et l'autre avec une des boules de l'excitateur à manches
. Approchant alors la seconde boule de celui-ci vers l'ar-
intérieure, une étincelle part entre cette boule et l'arma-
: une autre entre les branches de l'excitateur universel :
tte dernière qui foudroie l'objet placé sur le plateau.

Électromètre condensateur de Volta. — L'*électromètre*

Fig. 613.

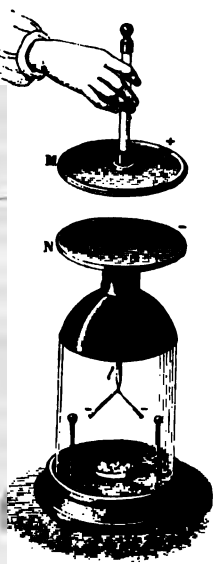


Fig. 614.

sateur, imaginé par Volta, n'est autre chose que l'électro-
à feuilles d'or déjà décrit (698), rendu beaucoup plus sen-
ar l'addition de deux disques condensateurs. La tige de

et l'on met l'autre plateau en communication avec le
touchant avec le doigt légèrement mouillé (fig. 613). L'
du corps soumis à l'expérience, se répandant alors sur
collecteur, agit par influence, au travers du vernis, sur
plateau et sur la main, pour repousser dans le sol l'éle
même nom et attirer celle de nom contraire. Les deux é
s'accumulent donc sur les plateaux, absolument comm
condensateur d'Æpinus, mais sans qu'il y ait divergence d
d'or, parce que toute l'électricité est condensée dans les
L'appareil ainsi chargé, on retire le doigt d'abord, puis
d'électricité, sans qu'on observe encore aucune diverge
si l'on enlève le plateau supérieur (fig. 614), l'électric
cond plateau se distribuant sur la tige et sur les feu
celles-ci divergent très-fortement. On augmente la div
adaptant au pied de l'appareil deux tiges de cuivre
par des boules de même métal : ces boules, en s'élect
l'influence des feuilles d'or, réagissent sur elles.

EFFETS DIVERS DE L'ÉLECTRICITÉ STATI

726. **Effets physiologiques.** — Les effets de l'électricit
se divisent *en effets physiologiques, lumineux, calorif*
caniques et *chimiques.*

Les *effets physiologiques* sont ceux que l'élec
les êtres vivants ou même récemment pri
sistent, chez les premiers, en une excitati

grande intensité et un caractère particulier, quand c'est de la bouteille de Leyde qu'on tire l'étincelle, en touchant d'une main son armature extérieure et de l'autre son armature intérieure. Avec une petite bouteille, la commotion se fait sentir jusque dans le coude; avec une bouteille d'un litre, on la ressent jusque dans l'épaule, et jusque dans la poitrine avec des bouteilles plus grandes.

La bouteille de Leyde peut donner simultanément la commotion électrique à un très-grand nombre de personnes. Pour cela, celles-ci doivent *former la chaîne*, c'est-à-dire se donner la main d'une manière continue; puis, la première touchant l'armature extérieure d'une bouteille chargée, et la dernière touchant en même temps le bouton de l'armature intérieure, toutes reçoivent simultanément la commotion, q[illegible] on gradue à volonté en chargeant plus ou moins la bouteille. L'a[illegible]bé Nollet donna ainsi la commotion à 300 hommes, qui la ressentirent en même temps, d'une manière violente, dans les bras et la poitrine. Dans cette expérience, à cause de la déperdition dans le sol, les hommes qui sont au milieu de la chaîne éprouvent une commotion moins vive que ceux qui sont rapprochés de la [illegible]uteille.

Avec les grandes bouteil[illegible] de Leyde et les batteries, la commotion ne peut plus se recevo[illegible]ément. Priestley a tué des rats avec des batteries dont ch[illegible]ature avait une surface totale de 63 décimètres carrés, e[illegible]nats avec des armatures dont la surface était de 3 mètres [illegible] et demi.

727. **Effets lumineux, a[illegible]trique.** — La recomposition des deux électricités à forte te[illegible] s'opère toujours avec un dégagement de lumière plus ou m[illegible]tense : c'est ce qui arrive quand on tire des étincelles de la [illegible]ine électrique, de la bouteille de Leyde et des batteries. L'é[illegible]ue la lumière est d'autant plus vif, que les corps entre lesquels a lieu l'explosion sont meilleurs conducteurs, et sa couleur varie non-seulement avec la nature de ces corps, mais avec l'atmosphère ambiante et la pression.

L'étincelle qui éclate ent[illegible] baguettes de charbon est jaune; entre deux boules de cuiv[illegible]ntées, elle est verte; avec des boules de bois ou d'ivoire, [illegible] cramoisie. Dans l'air, à la pression ordinaire, la lumière électrique est blanche et brillante; dans un air raréfié, elle est rougeâtre; dans le vide, elle est violacée, ce qui provient de ce que plus la résistance qui s'oppose à la recomposition des deux électricités est faible, moins l'électricité acquiert de tension. Dans l'oxygène, l'étincelle est blanche de [illegible] dans l'air; dans l'hydrogène, elle est rougeâtre, et verte [illegible]meur de mercure; dans l'acide carbonique, elle est [illegible]'azote, elle est bleue ou pourpre, et accompagnée d'un

bruit particulier. En général, l'étincelle a d'autant plus d'éclat, que la tension est plus grande. Fusinieri ayant fait voir que, dans l'explosion de l'étincelle électrique, il y a toujours transport de particules matérielles à un état de ténuité extrême, on doit en conclure que les modifications que présente la lumière électrique sont dues à la matière pondérable transportée.

On étudie les effets de la pression plus ou moins forte de l'air sur l'éclat de la lumière électrique, au moyen de l'*œuf électrique*. On nomme ainsi un globe de verre porté sur un pied de cuivre, dans lequel sont deux tiges de laiton terminées en boule (fig. 615).

Fig. 615 (h=60).

Fig. 616.

La tige inférieure est fixe, et la tige supérieure glisse à frotte[illegible] dans une boîte à cuir, de manière à pouvoir être rapproché[illegible] écartée à volonté. Le vide étant fait dans le globe, à 1 ou 2 [illegible] mètres (180), au moyen de la machine pneumatique, sur laq[illegible] il peut se visser, on fait communiquer la tige supérieure avec [illegible] forte machine électrique, et le pied avec le sol. Si l'on charge [illegible] la machine, on observe, d'une boule à l'autre, une lumière [illegible] lacée, peu intense et continue, qui est due à la recomposition [illegible]

cités contraires. Si on laisse rentrer l'air peu à peu, la ten-
ugmente avec la résistance, et la lumière, qui redevient
e et brillante, n'apparaît plus que sous la forme d'étincelle.
xpérience doit être faite dans l'obscurité.

Bouteille, tube et carreau étincelants. — On a imaginé de
eux appareils pour montrer les effets lumineux de l'élec-
; tels sont la *bouteille étincelante*, le *tube étincelant*, le
magique.

outeille étincelante est une bouteille de Leyde dont l'arma-
ntérieure est formée d'une couche de vernis sur laquelle on
adu de la limaille de cuivre. Une bande d'étain, collée au
nférieur de la bouteille, est en communication avec le sol,
yen d'une chaîne de métal (fig. 616); une seconde bande
plus haut porte un appendice arrivant à 2 centimètres en-
lu crochet, qui est très-recourbé. Cette bouteille étant sus-
e à la machine électrique, à mesure qu'elle se charge, l'é-
e part entre le crochet et l'armature, et de longues et bril-
étincelles éclatent sur la limaille.

ube étincelant est formé d'un tube de verre d'un mètre de

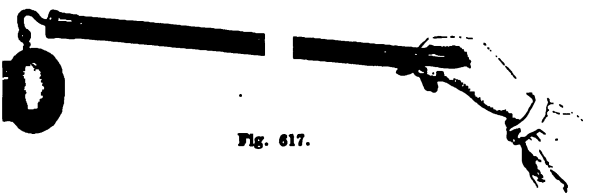


Fig. 617.

ur environ, dans lequel on a collé une série de petites
d'étain taillées en forme de losanges et disposées en hé-
it le long du tube, de manière à ne laisser entre elles que
utions de continuité fort petites. Aux extrémités sont deux
de cuivre avec crochet, communiquant avec les deux bouts
lice. Si, tenant le tube par un bout, on présente l'autre à la
e électrique (fig. 617), des étincelles jaillissent simultané-
chaque solution de continuité, et produisent une brillante
lumineuse, surtout dans l'obscurité.

rreau magique, fondé sur le même principe que le tube
nt, se compose d'un carreau de verre ordinaire sur le-
it collée une bande d'étain très-étroite, se repliant un
nombre de fois parallèlement à elle-même, comme le
le trait noir dans la figure 618. Sur cette bande d'étain,
ique, avec un instrument tranchant, des solutions de con-

tinuité très-petites, disposées de manière à représenter un objet déterminé : par exemple, un portique, une fleur, etc.; puis, fixant le carreau entre deux colonnes de verre, on met l'extrémité supérieure de la bande d'étain presque en contact avec la machine électrique, et l'on fait communiquer l'autre extrémité avec le sol. Faisant alors marcher la machine, l'étincelle jaillit à chaque solution de continuité, et reproduit en traits de feu l'objet qu'on a figuré sur le verre.

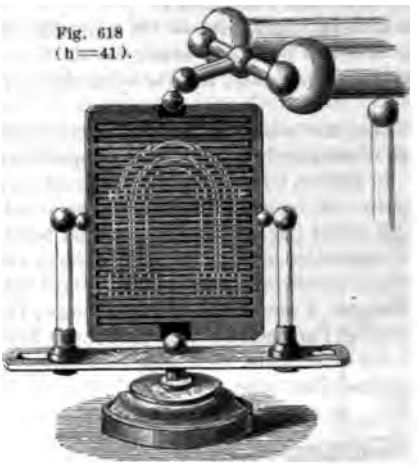


Fig. 618 (h=41).

729. **Effets calorifiques.** — L'étincelle électrique n'est pas seulement lumineuse, elle est aussi une source de chaleur très-intense. En traversant les liquides combustibles, comme l'alcool, l'éther, elle les enflamme; elle agit de même sur la poudre à canon, la résine pulvérisée, et fond même les métaux; mais alors il faut une batterie puissante. Une bouteille de Leyde ordinaire suffit pour enflammer l'alcool et l'éther. Pour cela, on prend un petit vase de verre dont le fond est traversé par une tige de cuivre à bouton, fixée à un pied de même métal (fig. 619). Ayant versé le liquide dans le vase de manière que le bouton soit entièrement recouvert, on présente à celui-ci le crochet d'une bouteille de Leyde chargée, en ayant soin de faire communiquer le pied de cuivre avec l'armature extérieure au moyen d'un fil métallique. Ce fil et le pied du vase remplissant l'office d'excitateur, l'étincelle jaillit au travers du liquide et l'enflamme. Avec l'éther

Fig. 619.

l'expérience réussit très-bien; pour réussir facilement avec l'alcool, il faut d'avance chauffer un peu le liquide.

Lorsqu'on fait passer la décharge d'une batterie dans un fil de fer, il devient rouge blanc, et brûle avec une lumière éblouissante. Les fils de platine, d'or, d'argent, sont fondus et volatilisés. Van Marum, avec une forte machine à deux plateaux et une puissante batterie, a fondu un fil de fer de 16 mètres de longueur.

Si l'on soumet à la décharge d'une batterie une feuille d'or isolée entre deux lames de verre ou entre deux rubans de soie, l'or est volatilisé, et l'on a pour résidu une poudre violette qui n'est autre chose que de l'or très-divisé. C'est ainsi qu'on obtient les *portraits électriques*.

730. **Effets mécaniques.** — Les effets mécaniques sont des déchirements, des ruptures, des expansions violentes, qui résultent,

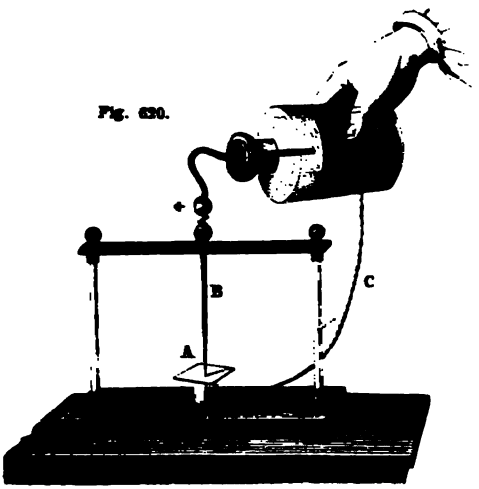


Fig. 620.

ns les corps peu conducteurs, du passage d'une forte décharge ectrique. Le verre est percé; le bois, les pierres, sont brisés; az et les liquides sont fortement ébranlés. Les effets méques de l'étincelle électrique se démontrent au moyen de difts appareils, qui sont le *perce-verre*, le *perce-carte*, le *nomètre de Kinnersley* et l'*excitateur universel*.

perce-verre se compose de deux colonnes de verre qui s nt, au moyen d'une traverse horizontale, un conducteu iné en pointe (fig. 620). La lame de verre A, qu'il s'ag

percer, repose sur un cylindre de verre, dans lequel est un second conducteur, aussi terminé en pointe. Celui-ci étant mis en communication, par un fil métallique, avec l'armature extérieure d'une forte bouteille de Leyde, on approche le crochet de la bouteille du bouton qui termine le conducteur B. L'étincelle éclate alors entre les deux conducteurs, et le verre est percé. Toutefois cette expérience ne réussit avec une bouteille de Leyde un peu forte qu'autant que la lame de verre est mince; autrement il faut faire usage d'une batterie. Le même appareil sert très-bien de perce-carte.

L'ébranlement et l'expansion subite que l'étincelle fait naître dans les gaz se démontre avec le thermomètre de Kinneraley. Il se compose d'un fort tube de verre mastiqué, à ses deux bouts,

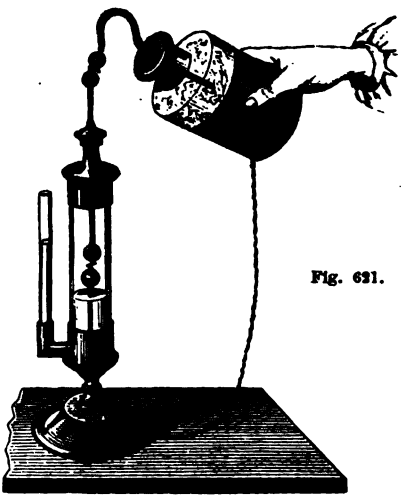


Fig. 621.

dans des garnitures de cuivre qui ferment hermétiquement et s[illegible] portent deux conducteurs terminés en boule, l'un fixe, l'autre [illegible] sant dans une boîte à cuir (fig. 621). Latéralement est un se[illegible] tube ouvert à sa partie supérieure. Ayant dévissé la boîte à c[illegible] on verse de l'eau dans le gros tube jusqu'à ce que le niveau [illegible] trouve un peu au-dessous de la boule inférieure; serrant alo[illegible] boîte à cuir, on fait passer la décharge d'une bouteille de L[illegible] entre les deux boules, en s'y prenant comme le montre le [illegible] sin. L'eau, instantanément refoulée hors du gros tube, s'[illegible] de 2 centimètres environ dans le petit; mais le niveau se ré[illegible] aussitôt, ce qui montre que le phénomène n'est point dû à [illegible]

de température, et que la dénomination de thermomètre l'appareil est fausse.

ateur universel, déjà décrit en parlant des batteries, et é dans la figure 612, sert aussi à obtenir des effets mé- Veut-on, par exemple, faire éclater un morceau de le place sur le petit plateau où l'on a figuré un oiseau, sant toucher les deux boules des conducteurs. Faisant ser la décharge, le morceau de bois vole en éclats.

Effets chimiques. — Les effets chimiques de l'électricité ombinaisons et des décompositions que détermine l'étin- trique lorsqu'elle traverse les corps. Par exemple, quand sont mélangés à peu près dans le rapport suivant lequel ar combinaison, une seule étincelle suffit pour la déter- ais si le mélange est loin de ce rapport, la combinaison longue série d'étincelles. Priestley reconnut le premier qu'on fait passer pendant longtemps des étincelles élec- travers d'une quantité déterminée d'air atmosphérique, d'air diminue, et de la teinture de tournesol, introduite se qui le contient, rougit. Cavendish, ayant répété cette e avec soin, trouva qu'il se formait, en présence de l'eau ses, de l'acide azotique résultant de la combinaison de et de l'azote de l'air.

nd nombre de gaz sont décomposés par l'action prolongée elle électrique. L'hydrogène carboné, l'acide sulfhydri- moniaque, le sont complétement; l'acide carbonique ne n partie, en oxygène et en oxyde de carbone. L'étincelle ines décompose même les oxydes, l'eau et les sels; mais té statique est loin de présenter des effets chimiques rgiques et aussi variés que l'électricité dynamique.

Pistolet de Volta. — Le *pistolet de Volta* est un appareil à démontrer les effets chimiques de l'étincelle électri- compose d'un petit vase de fer-blanc (fig. 622), dans introduit un mélange détonant formé de 2 volumes d'hy- et de 1 volume d'oxygène, puis on le ferme hermétique- un bouchon de liége. Sur la paroi latérale est une tu- ns laquelle passe une tige métallique terminée par deux oules A et B, et mastiquée dans un tube de verre, qui reste de l'appareil. Tenant celui-ci à la main, on l'ap- la machine électrique (fig. 623). Le bouton A s'électri- négativement par influence, et le bouton B positive- tincelle part entre le bouton A et la machine, et, da tant, une deuxième étincelle jaillit entre le bout lu vase qui communique avec le sol par la mai

cette dernière étincelle qui détermine la combinaison des deux gaz. Cette combinaison étant accompagnée d'un vif dégagement de chaleur (451), la vapeur d'eau qui prend naissance acquiert une

Fig. 622.

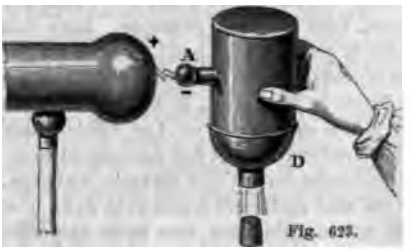


Fig. 623.

force expansive telle, que le bouchon est projeté avec une détonation égale à celle d'un coup de pistolet.

733. **Eudiomètre.** — *L'eudiomètre*, dont on se sert en chimie pour faire l'analyse des gaz, est encore un appareil fondé sur les effets chimiques de l'électricité. On l'a modifié de plusieurs manières. La figure 624 représente l'eudiomètre le plus simple. Il se compose d'une éprouvette de cristal, à paroi très-épaisse. L'extrémité fermée de l'éprouvette est traversée par une tige de fer ou

Fig. 624.

de laiton terminée par deux boules *m* et *n*, l'une extérieure, l'autre intérieure. Près de la boule intérieure *n* en est une seconde *o*, laquelle est fixé un fil de fer ou de laiton, contourné en hélice, se prolongeant jusqu'à la partie ouverte de l'eudiomètre.

Pour faire avec cet instrument l'analyse d'un mélange gazeux

par exemple, on le remplit d'abord d'eau, puis on le ren-
ır une cuve à eau, et l'on y fait passer, à l'aide d'un en-
renversé, 100 parties d'air et 100 d'hydrogène, qu'on a
es avec un tube gradué. On ferme ensuite l'eudiomètre
pouce, en ayant soin de mettre celui-ci en contact avec le
élice. Si un aide approche alors le plateau d'un électro-
699) de la boule *m*, une étincelle part entre celle-ci et le
A, et en même temps une seconde entre les deux boules
C'est cette dernière qui détermine, avec une vive lumière,
ɔinaison de l'oxygène et de l'hydrogène pour former de
i l'on mesure alors, en le faisant passer dans un tube gra-
gaz qui reste dans l'instrument, on trouve que son volume
; il a donc disparu 63 parties des gaz mélangés. Or, comme
que l'eau est formée de 2 volumes d'hydrogène pour 1
ne, il s'ensuit que le tiers de 63, ou 21, est le volume d'oxy-
ıtenu dans 100 parties d'air.

les effets chimiques de l'électricité, qui viennent d'être
, c'est par l'étincelle que ces effets sont obtenus; or les
ıènes sont alors compliqués d'effets calorifiques et d'effets
ques, qui les dénaturent. Nous ferons connaître plus tard,
nom d'*effluve électrique* (895), un nouveau mode d'expé-
ıtion, dû à M. du Moncel, par lequel on obtient des résul-
ıucoup plus remarquables et plus féconds que par l'étin-

734. **Expérience et théorie de Galvani.** — C'est à Galvan fesseur d'anatomie à Bologne, qu'est due l'expérience fon tale qui a fait découvrir l'électricité dynamique (672), ou *vanisme*, cette branche nouvelle de la physique, si rema par les nombreuses applications qu'elle a reçues.

Galvani étudiait depuis plusieurs années l'influence de tricité sur l'irritabilité nerveuse des animaux, et particuliè de la grenouille, lorsqu'en 1786 il eut occasion d'observer nerfs lombaires d'une grenouille morte s'étant trouvés e munication, par un circuit métallique, avec les muscles c ceux-ci se contractèrent vivement.

Pour répéter l'expérience de Galvani, on écorche une gre encore vivante, et on la coupe au-dessous des membres an (fig. 625); puis, après avoir mis à nu les nerfs lombaires des deux côtés de la colonne vertébrale sous la forme d blancs, on prend un conducteur métallique formé de deux ar et cuivre, et, introduisant l'un d'eux entre les nerfs et la vertébrale, on fait toucher l'autre aux muscles de l'une des ou des jambes. A chaque contact, les muscles se replient et s' et cette moitié de grenouille semble repre

Galvani, qui déjà avait reconnu, dès 17 machines électriques produisait des commotio

), déjà connu par l'invention de l'électrophore, de l'électro-
e condensateur et de l'eudiomètre.

5. **Expériences de Volta.** — L'attention de Galvani s'était por-
xclusivement sur les nerfs et les muscles de la grenouille;

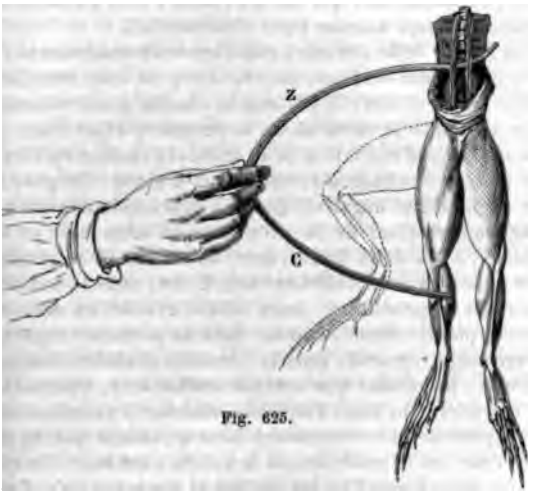


Fig. 625.

de Volta se porta sur les métaux qui servent à établir la com-
cation. Se fondant sur l'observation, qui n'avait point échappé
vani, que la contraction musculaire est beaucoup plus éner-
lorsque l'arc est composé de deux métaux que lorsqu'il l'est
seul, Volta attribua aux métaux le rôle actif dans le phéno-
de la contraction. Il admit que c'était par l'effet même de
ontact qu'il y avait dégagement d'électricité, et que les par-
nimales ne jouaient là que le rôle de conducteur, et, en
temps, d'électroscope très-sensible.

'aide de l'électromètre condensateur qu'il venait d'inventer,
parut, en effet, démontrer, par de nombreuses expériences,
eloppement de l'électricité au contact des métaux. Nous ci-
les suivantes, faciles à répéter.

lyant soudé ensemble, par leurs bouts, deux lames étroites,
de cuivre, l'autre de zinc, on pose un doigt sur le plateau
leur de l'électromètre (fig. 613, page 667); puis, de l'autre
tenant la lame de zinc entre les doigts à l'état naturel, ou
ment mouillés d'eau acidulée, on touche le plateau infé-
avec la lame de cuivre; rompant ensuite les communica-

tions et enlevant le plateau supérieur, les feuilles d'or divergent (fig. 614), et l'on constate qu'elles sont électrisées négativement.

2° On recommence la même expérience en tenant à la main l'extrémité cuivre des deux lames soudées, et en touchant le plateau de l'électromètre, qui est de cuivre, avec l'extrémité zinc; on n'observe alors aucune trace d'électricité.

3° On répète cette dernière expérience en interposant, entre le plateau et la lame de zinc, une rondelle de drap mouillée d'eau acidulée : dans ce cas, le plateau se charge positivement.

Volta expliqua le résultat de la première expérience par une *action de contact* entre le zinc et le cuivre, action en vertu de laquelle le zinc se chargeait, selon lui, d'électricité positive et le cuivre d'électricité négative. Quant à la seconde expérience, elle était la confirmation de la première : la lame zinc se trouvant en contact, à ses deux bouts, avec du cuivre, il se produit deux actions opposées dont l'effet est nul. Enfin, dans la troisième, un seul contact se produisant entre cuivre et zinc, ce dernier métal s'électrise positivement, comme dans la première expérience, et le cuivre négativement; puis la rondelle acidulée, toujours suivant Volta, n'agissant que comme conducteur, transmet au plateau l'électricité du zinc. Toutefois, comme la première et la troisième expérience ne réussissent bien qu'autant que la main qui tient le zinc, ou la rondelle qui la touche, est mouillée d'eau acidulée, on prévoit que l'action de l'acide sur le zinc n'est pas étrangère au dégagement d'électricité, ce qui sera bientôt démontré.

Des expériences de Volta et de Galvani naquit entre eux une lutte mémorable. Le dernier trouva que la présence de deux métaux n'était pas indispensable à la production du phénomène, qu'on obtient des contractions en posant sur un bain de mercure pur une grenouille morte et fraîchement préparée. Enfin, il voir qu'en rapprochant les nerfs lombaires de la grenouille des muscles cruraux, il se produit, au moment du contact, une contraction. Dans cette dernière expérience, les métaux ne jouent plus aucun rôle, et la théorie de Galvani paraissait victorieuse; mais Volta la combattit alors en donnant plus d'extension à la théorie du contact, et en posant ce principe général, que *deux substances hétérogènes quelconques, mises en contact, se constituent toujours, l'une à l'état positif, l'autre à l'état négatif.*

Cependant Galvani fit une dernière expérience dans laquelle il était impossible d'admettre un effet de contact, puisqu'il ne fait toucher que des substances homogènes. Il plaça sur un disque de verre une cuisse de grenouille munie de son nerf lombaire, et à côté une seconde cuisse disposée de la même manière; ayant

nerf de la seconde sur celui de la première, en sorte qu'au point
: contact il n'y eût que de la substance nerveuse, il fit toucher
s deux cuisses, et obtint une forte contraction. Galvani était
nc parvenu à démontrer l'existence de l'électricité animale,
ise en évidence de nos jours par Matteucci, sous le nom de *cou-
nt propre* de la grenouille.

736. **Théorie du contact de Volta.**— Volta, physicien avant tout,
jeta la théorie de l'électricité animale, et se fondant sur les ex-
ériences qui précèdent, il admit exclusivement la *théorie du
ntact*, qu'il formula par les deux principes suivants :

1° Le contact de deux corps hétérogènes donne toujours nais-
nce à une force que Volta a désignée sous le nom de *force élec-
omotrice*, laquelle a pour caractère non-seulement de décom-
oser une partie de leur électricité naturelle, mais de s'opposer à
recomposition des électricités contraires rendues libres sur les
ux corps, en sorte que, malgré le contact, l'un reste électrisé
ositivement, l'autre négativement.

2° Lorsque deux substances hétérogènes sont en contact, la dif-
rence algébrique de leurs états électriques est constante pour
s mêmes corps, *quelle que soit la charge d'électricité sur cha-
n d'eux*, et égale à la force électromotrice. C'est-à-dire que,
ux disques zinc et cuivre étant mis en contact et isolés tous les
ux, si l'on représente par $+e$ la quantité d'électricité positive
le zinc, et par $-e$ la quantité d'électricité négative sur le
vre, la différence algébrique est $2e$; mais qu'on communique
système zinc et cuivre, ou qu'on en soustraie une quantité
ctricité q, la charge électrique sur le zinc est $e \pm q$, et sur le
$-e \pm q$, quantités dont la différence est encore $2e$.

e quantité $2e$, indépendante de la quantité d'électricité com-
uée ou soustraite au système des deux disques zinc et cuivre,
ente la force électromotrice qui se développe à leur contact.

, ayant reconnu que cette force varie avec les substances
act, a divisé les corps en *bons électromoteurs* et en *faibles
oteurs*. Dans la première classe sont les métaux et le char-
n calciné; dans la seconde, les liquides et les corps non
ues. Les métaux eux-mêmes ne sont pas également bons
oteurs; le zinc et le cuivre soudés ensemble sont deux
leurs électromoteurs. Enfin, l'espèce d'électricité déve-
ange avec la nature des substances en contact.

se basant sur la théorie du contact que Volta fut con-
nter le merveilleux appareil qui a immortalisé son nom.
ie cependant ne tarda pas, elle aussi, comme celle de
rencontrer de nombreux contradicteurs, et on verra

qu'on verra bientôt que le contact est la condition *néce*
que l'action chimique persiste et pour qu'il y ait couran

737. **Pile de Volta.** — On donne le nom général de
les appareils qui servent à développer de l'électricité d
Le premier appareil de ce genre, inventé par Volta e
compose d'une suite de disques empilés les uns sur
dans l'ordre suivant : un disque de cuivre, un disque d
rondelle de drap mouillée d'eau acidulée ; puis encore
de cuivre, un disque de zinc, une rondelle de drap,
suite, toujours dans le même ordre, comme le mont
626, en ayant soin de maintenir les disques à l'aide de
isolants de verre. C'est cette disposition qui a fait don
pareil le nom de *pile*, nom qui est resté, quoiqu'on
depuis des formes très-variées. La pile qu'on vient de
connue sous le nom de *pile à colonne*, ou *pile de Vol*

Pour empêcher l'oxydation et mieux établir les c
soude deux par deux les zincs et les cuivres, de manié
des *couples* séparés par des rondelles, en entendant i
ple, la réunion d'un zinc et d'un cuivre *en contact ;* dan
chimique, ce mot a une autre acception (749).

Soient les couples disposés comme dans les figures
c'est-à-dire les zincs au-dessus des cuivres. Dans la
contact, l'extrémité supérieure, qui est un zinc, est
l'extrémité inférieure, qui est un cuivre, est négative.
remarquer qu'il en est encore de même dans la théorie

imés, comme le montre la figure 628, sans rien changer à l'es-
ce d'électricité que possède respectivement chaque extrémité
la pile. En effet, le cuivre C emprunte encore la même charge d'électricité positive à la rondelle r, et le zinc Z_4 prend aussi la même charge d'électricité négative par l'action de la rondelle r_4.

Puisque la distribution de l'électricité est la même dans les deux figures 627 et 628, on ne peut déterminer l'espèce d'électricité accumulée à chaque extrémité de la pile par les métaux qui la terminent, mais déjà on peut dire que *l'extrémité positive est celle vers laquelle*

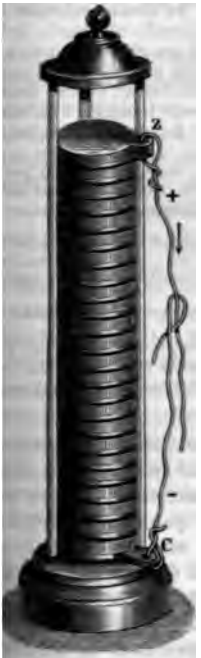


Fig. 626.

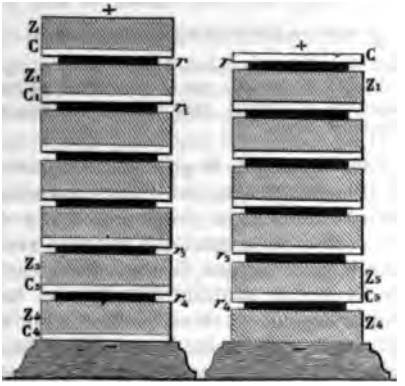


Fig. 627. Fig. 628.

ont tournés les zincs de chaque couple, et l'extrémité négative elle vers laquelle sont tournés les cuivres. On verra plus loin un aractère chimique qui conduit à la même détermination (749).

738. **Distribution de l'électricité dans la pile de Volta.** — La distribution l'électricité n'est pas la même dans la pile de Volta, suivant qu'elle est isolée, qu'elle communique avec le sol par une de ses extrémités.

1° *Pile non isolée.* — Soit d'abord l'extrémité cuivre en communication avec sol (fig. 627). La charge ou *densité* électrique sur le cuivre C_4 est alors zéro; la différence des densités électriques sur le cuivre et le zinc d'un même couple étant constante et égale à $2e$ (736), le zinc Z_4 prend la densité $2e$; puis, se communiquant par la rondelle r_4 au cuivre C_3, le couple C_3 Z_3 passe densité $2e$, et comme la force électromotrice qui lui est propre lui commu- même densité $2e$, sa charge électrique finale est $4e$. Par la même rai- couples suivants prennent successivement les densités électriques $6e$, $8e$..., dernier couple la densité $2ne$, n étant le nombre total des couples.

Il est donc permis de regarder la pile isolée comme composée d
rentrant dans le cas de la pile non isolée : c'est-à-dire, *une moit*
chargée d'électricité positive, et ayant pour densités électriques ex
$+\frac{1}{2}n \times 2e$, en représentant par n le nombre total des couples ; *l'au*
entière chargée d'électricité négative, et ayant pour densités extr
$-\frac{1}{2}n \times 2e$. La différence des densités aux deux extrémités de la pi
core $2ne$, comme ci-dessus. Cette théorie, due à Volta, a été vé
Tout ce qui précède sur la distribution de l'électricité dans la
s'applique exactement, dans la théorie chimique, à toutes les p
décrites ci-après.

739. **Tension de la pile.** — La *tension* d'une pile est
de l'électricité accumulée aux extrémités à se dégager
les résistances qui s'opposent à son déplacement.
pas confondre la tension d'une pile avec la *quantité*
qu'elle peut dégager. La tension dépend du nombre d
tandis que la quantité d'électricité, toutes choses é
leurs, dépend de leur surface. Plus cette surface
plus, à tension égale, la quantité d'électricité qui cir
pile est considérable. Cette quantité croît aussi avec l
bilité du liquide interposé entre les couples. La tensi
traire, est indépendante de la nature de ce liquide.

A moins d'un nombre de couples considérable, la
extrémités de la pile, est toujours beaucoup plus faib
les machines électriques. En effet, non-seulement ch

[redacted]

740. **Pôles, électrodes, courant.** — Dans une pile, on nomme *ôle positif* l'extrémité où se rend l'électricité positive, et *pôle égatif* celle où se rend la négative. On a vu, dans la pile à co-nne (737), que le pôle positif est celui vers lequel sont tournés s zincs de chaque couple, et le pôle négatif celui vers lequel nt tournés les cuivres. Ajoutons que, dans toute pile, les cou-es étant composés d'une substance inattaquable par les acides, mme le platine, le charbon, ou peu attaquable, comme le cui-e, et d'un métal très-attaquable, le zinc, c'est toujours au métal attaquable que correspond le pôle positif, et le pôle négatif au étal attaquable, ce qui sera constaté dans la théorie chimique.

On appelle *électrodes*, ou *réophores*, deux fils métalliques fixés ıx pôles de la pile (fig. 626), et destinés à les faire communi-ıer entre eux, en sorte que les extrémités de ces fils deviennent les-mêmes les pôles.

On nomme *courant* la transmission électrique d'un pôle à ıutre de la pile, lorsqu'ils communiquent entre eux au moyen électrodes ou d'un corps conducteur quelconque. Ce n'est qu'au oment où cette communication est établie que le courant prend ıissance, ce qu'on exprime en disant que le courant est *fermé*.

On admet deux courants, l'un *positif* allant du pôle positif au ôle négatif dans les électrodes, l'autre *négatif* marchant en sens ntraire. Toutefois, dans tous les phénomènes que présentent les urants, on ne considère toujours que le courant positif, c'est-dire celui qui va du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur de pile, et du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur.

Dans la théorie nouvelle de l'électricité, où l'on admet que celle-a pour cause l'éther agissant par sa masse et par son dépla-ment (679), le courant n'a lieu que dans un seul sens du pôle sitif au pôle négatif; c'est un *flux* de l'éther, de la partie conden-e vers la partie raréfiée, sous la forme d'ondes successives qui se confondent en aucune façon avec les ondes lumineuses.

DIVERSES MODIFICATIONS DE LA PILE

741. **Pile à auges.** — La pile de Volta a reçu diverses disposi-ns. La pile à colonne (fig. 626) présente l'inconvénient que les delles de drap, comprimées par le poids des disques, laissent le liquide dont elles sont imbibées. C'est pour cette rai-n adopta promptement la *pile à auges*, due à Cruikshank, n'est, pour ainsi dire, qu'une pile à colonne horizontale. compose d'une boîte rectangulaire de bois, enduite inté-nent d'un mastic isolant (fig. 629). Les plaques zinc et

cuivre, soudées entre elles deux par deux, forment des couples qui ont une grandeur égale à la section intérieure de la boîte et qui sont fixés dans le mastic, de manière qu'il y ait, d'un couple à l'autre, des intervalles peu considérables formant autant de compartiments ou *auges*. Dans celles-ci, on verse un mélange d'eau et d'acide sulfurique, qui produit le même effet que les

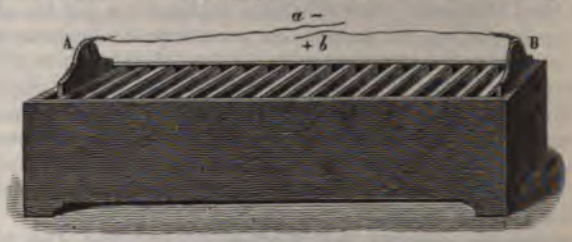


Fig. 629.

rondelles dans la pile à colonne; les deux pôles communiquent entre eux au moyen de fils métalliques fixés à deux plaques de cuivre A et B, qui plongent dans les auges extrêmes.

742. **Pile de Wollaston.** — La *pile de Wollaston*, ou *pile à bocaux*, est encore une modification de la pile de Volta, mais une modification importante, parce qu'elle est disposée de manière qu'on peut facilement ne mettre la pile en activité que juste le temps pendant lequel on veut utiliser le courant.

La figure 630 montre une coupe verticale de deux couples de la pile de Wollaston; la figure 631 représente séparément le zinc et le cuivre destinés à plonger dans un même bocal. Les zincs Z sont taillés en plaques rectangulaires d'une épaisseur de 4 à 5 millimètres, sur environ une hauteur de 20 centimètres et une largeur de 15. Les cuivres sont en feuilles minces C de même largeur que les zincs, et recourbées de manière à les envelopper sur leurs deux faces, mais sans les toucher, étant maintenues à distance par de petits morceaux de liége ou de bois. De chaque feuille de cuivre part une lame étroite *o* qui se prolonge, et, se recourbant deux fois à angle droit, va se souder au zinc du couple suivant. La figure 630 fait voir comment la première lame étroite *o* est soudée au premier zinc Z; puis comment autour de celui-ci s'enroule la première feuille de cuivre C, de même largeur que le zinc, laquelle se termine par une lame étroite *o'*, qui va se souder au deuxième zinc Z; et ainsi de suite, de manière à réunir autant de couples que l'on veut. Enfin, ces lames zinc et cuivre plongent *deux* à deux dans des bocaux étroits remplis d'eau acidulée.

figure 632 représente une pile de 16 couples réunis parallè-
ent en deux séries de 8. Le premier cuivre C, étant soudé à un
, représente le pôle négatif. Quant au pôle positif, il corres-

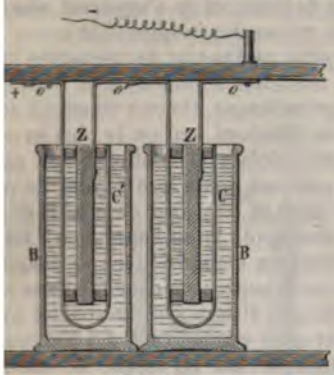


Fig. 630.

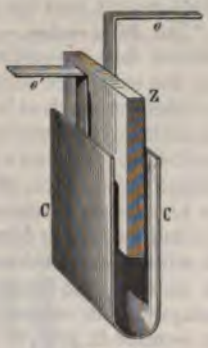


Fig. 631.

l au dernier cuivre *m*, qui, n'étant en contact avec aucun
, ne fait qu'enlever au liquide l'électricité positive qui lui est

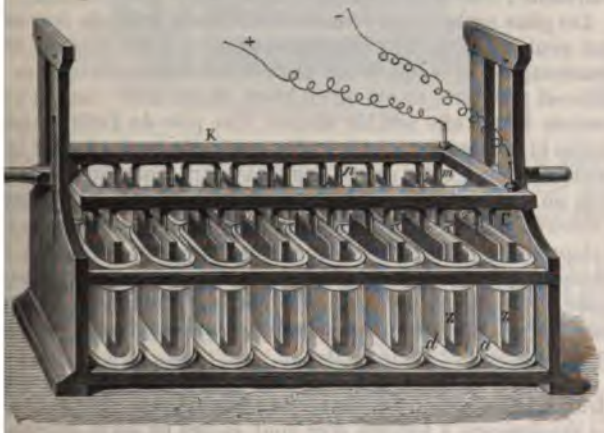


Fig. 632.

ie par le dernier couple. Tous les couples étant fixés à un
de bois K, qui peut s'élever ou s'abaisser à volonté entre
montants, on soulève le cadre aussitôt qu'on ne veut plus

les métaux électromoteurs sont l'étain et le bioxyde
nèse. Pour construire cette pile, on prend une feuill
étamée sur une face, et sur l'autre on fixe, avec de la co
du bioxyde de manganèse bien lavé. Ayant superpos
ces feuilles, on les découpe avec un emporte-pièce en
25 millimètres de diamètre qu'on superpose dans le m
de manière que l'étain de chaque disque soit en cont
manganèse du suivant. Ayant ainsi empilé 1200 à 18
on termine la pile, à chaque bout, par un disque de
l'on serre tout le système fortement avec des fils de
établir les contacts. C'est au disque de cuivre en cont
manganèse que correspond le pôle positif; au disque
extrémité, c'est-à-dire au pôle étain, est le pôle néga

Les piles sèches sont remarquables par la durée de l
qui peut se prolonger plusieurs années. Leur éner
beaucoup de la température et de l'état hygrométriq
Elle est plus forte en été qu'en hiver, et une forte chal
raviver lorsqu'elle semble éteinte. Une pile de 2000
donne ni commotion ni étincelle; mais elle peut char
teille de Leyde et les autres condensateurs. Toutefois i
cela un certain temps, parce que, la pile étant peu co
l'électricité ne se meut que lentement dans son intéri
veloppement de l'électricité dans ces piles est dû
chimique résultant de l'oxydation de l'étain par la dé
lente des matières organiques et par la réduction du

sée par l'autre, et son électricité est évidemment contraire à du pôle vers lequel elle se dirige.

745. **Appareil à rotation.**— On construit, sous le nom de *jeux ague*, de petits appareils à rotation continue, dont le mouve- t persiste pendant plusieurs années. Deux colonnes de cuivre *b*, fixées sur un socle de bois, communiquent par leur base,

Fig. 633.

u pôle positif, l'autre au pôle négatif d'une forte pile sèche horizontalement au-dessous du socle (fig. 633). Cette pile nairement formée de six piles plus petites communiquant les et comprenant en tout 1800 couples.

n pivot *c*, placé à égale distance des deux colonnes *a* et *b*, chape d'ivoire *i*, à laquelle sont liés quatre supports qui ent de petites figures peintes sur un carton très-léger. Ces se terminent par de petits étendards de clinquant fixés gomme laque qui les isole. Ces étendards, attirés d'abord ricité des boules qui terminent les colonnes, les touchent gent de la même électricité qu'elles. Repoussés alors, ils à tourner, et les deux étendards positifs, par exemple, poussés par la colonne *a*, se trouvent au contraire atti- olonne *b*, qu'ils viennent toucher pour être repoussés l'où résulte une rotation qui se prolonge tout le tem fonctionne, c'est-à-dire pendant plusieurs années

physiciens. Fabroni, compatriote de Volta, ayant obs
disques de zinc s'oxydaient au contact des rondelles
pensa que cette oxydation était la cause principale du
de l'électricité. En Angleterre, Wollaston avança bien
opinion, et Davy l'appuya de nombreuses expériences

Pour démontrer le dégagement d'électricité dans les
miques, on pose sur le plateau de l'électromètre cond
disque de papier mouillé, et dessus, une capsule de z
quelle on verse de l'eau acidulée avec de l'acide sulfu
on plonge dans le liquide une lame de platine commun
le sol, tandis qu'on fait aussi communiquer avec lui l
férieur en le touchant avec le doigt mouillé. Lorsqu'c
communications et qu'on enlève le plateau supérieu
naît que les feuilles d'or ont pris une quantité sensib
cité positive, ce qui montre que le plateau supérieur
trisé négativement par l'action chimique de l'acide su
les parois de la capsule.

Mais c'est surtout à l'aide du galvanomètre (792) qu'c
que toutes les actions chimiques sont accompagnées d
ment d'électricité plus ou moins abondant. Ayant fix
de zinc à l'un des bouts du fil du galvanomètre, et à
lame de cuivre, on plonge les deux lames dans de l'e
Aussitôt l'aiguille dévie, et le sens de la déviation f
le zinc est électrisé négativement et le liquide positiv

Le dégagement d'électricité est général dans toute

rtant comme tels, le premier prend l'électricité posi-
e second l'électricité négative.
nd un acide agit chimiquement sur un métal, l'acide
e positivement et le métal négativement, ce qui est une
nce de la deuxième loi.
s les décompositions, les effets électriques sont inverses
dents.
r les doubles décompositions, l'équilibre des forces élec-
'est point troublé.
à la quantité d'électricité dégagée dans les actions chi-
elle est énorme. En effet, M. Becquerel est arrivé à ce
qui effraye l'imagination, que l'oxydation du poids d'hy-
qui entre dans un milligramme d'eau, dégage suffisam-
ectricité pour charger *vingt mille fois une surface mé-*
l'un mètre de superficie, à un tel degré, que les étincelles
à un centimètre de distance. Faraday, Pelletier et Buff
enus à des résultats semblables.

héorie électro-chimique d'Ampère. — Se basant sur l'élec-
i devient libre dans les actions chimiques, Ampère a
théorie électro-chimique suivante.
moment où deux atomes se combinent, ils s'emparent,
ités égales, l'un d'électricité positive, l'autre d'électri-
tive, électricités qui disparaissent aussitôt par la for-
un composé à l'état neutre, et il a nommé *électro-posi-*
orps qui prennent l'électricité positive (l'hydrogène, les
t les bases), et *électro-négatifs* les corps qui prennent
té négative (l'oxygène, le soufre, les acides et les corps
rtant comme tels).
ène, dans toutes ses combinaisons, est constamment élec-
if, le potassium électro-positif. Les autres corps simples
t électro-positifs, tantôt électro-négatifs, suivant le corps
el ils sont combinés. Le soufre, par exemple, qui est élec-
f avec l'oxygène, est électro-négatif avec l'hydrogène.
e hypothèse admise, Ampère explique ainsi le dégage-
'électricité dans un couple : le zinc étant en contact avec
t chaque atome de celui-ci, qui s'unit au zinc, s'emparant
ntité d'électricité négative — A, une quantité égale d'é-
positive + A reste libre dans le liquide et l'électrise po-
it, ce qui est conforme à la troisième loi ci-dessus. De
aque atome de zinc, qui se combine, s'emparant d'une
d'électricité positive + A, une quantité égale d'électri-
tive devient libre sur la portion de métal non attaquée.
lire que l'électricité qui apparaît dans la pile n'est

cuivre, non juxtaposés, plongeant dans de l'eau acidu
pile est une série de couples réunis de manière que
chacun soit en contact avec le cuivre du couple suiva

1° *Cas d'un seul couple.* — Soit d'abord un coupl
composé d'une lame de zin
lame de cuivre plongées da
acidulée avec de l'acide
(fig. 634). Au contact du zinc
acidulée, l'action chimique
sance à une force électron
charge le zinc Z négativem
acidulée positivement (747 et
au cuivre C, comme il est se
inattaquable par l'acide sulf
température ordinaire, il ne s
cueillir l'électricité positive

Fig. 634.

A cet état, si les lames zinc et cuivre ne sont pas
un conducteur, elles se chargent respectivement d'élect
traires jusqu'à ce qu'elles acquièrent une tension capa
équilibre à la force électromotrice, c'est-à-dire à l'actio
qui tend à leur fournir une nouvelle quantité d'électr
tion chimique cesse alors, du moins si le zinc est pu
gamé (759); mais si l'on réunit le zinc et le cuivre p
ducteur extérieur, les deux électricités se recombinent
libre étant détruit, la force électromotrice reproduit a
nouvelle quantité d'électricité. De là un courant contin
au zinc à l'extérieur du couple, et du zinc au cuivre à l

Le pôle positif correspond donc, comme il a été dit
cuivre, c'est-à-dire au métal sensiblement inactif, et l

antage, dans le couple voltaïque, le cuivre par le platine le charbon de coke bien calciné.

ns de plusieurs couples. — Soit actuellement une pile forune série de couples identiques, associés de manière que de chacun soit en contact avec le cuivre du suivant. L'acimique, dans chaque couple, étant la même que s'il était l se produit dans tous une force électromotrice égale, et ite une tension ou densité électrique qui, se superposant ouple au suivant, donne une tension finale sensiblement tionnelle au nombre des couples, proportionnalité qui n'est e simple hypothèse, comme l'avait admis Volta (736), mais physique constaté par l'expérience. La théorie chimique ille peut donc se résumer dans les lois suivantes :

action chimique, dans chaque couple, développe une force motrice qui électrise le cuivre positivement et le zinc négatif.

a force électromotrice communique aux éléments de chaque une différence de tension constante, qui se superpose ouple au suivant; et, par suite, la tension croît proporllement au nombre des couples.

ant que le circuit est ouvert, la tension, dans chaque couple, uilibre à la force électromotrice, et l'action chimique cesse.

orsque le circuit est fermé par un conducteur, les électriontraires se recombinent, et l'action chimique recommen- un flux continu d'électricité s'établit du pôle positif au égatif dans le conducteur : c'est le courant.

iproquement, les courants produisent des effets chimiques, ront décrits sous le nom d'*électrolysation* (776).

La force électromotrice varie avec les métaux et avec les — A surface égale et au contact d'un même acide, les difs métaux ne dégagent pas des quantités égales d'électricité. 'acide sulfurique étendu, et l'un des éléments du couple me lame de platine, M. Ed. Becquerel a trouvé qu'en représent par 100 la quantité d'électricité dégagée par le zinc pur, tres métaux fournissent les quantités suivantes :

assium	173	Mercure	31
e amalgamé	103	Or	0
tin	66	Platine	0
	61	Charbon	0
rouge	35		

s deux éléments d'un couple sont attaquables, par exemple cuivre, la force électromotrice réelle est la différence des es ci-dessus.

res. — Les diverses piles à colonne, à auges, de Wollaston précédemment, et qui ont toutes pour caractère d'être de deux métaux et d'un seul liquide, présentent le grav nient de donner des courants dont l'intensité décroît ra

Cet affaiblissement est dû à deux causes : la première croissement des actions chimiques par la neutralisation sulfurique à mesure qu'il se combine avec le zinc; la provient des *courants secondaires.* On nomme ainsi de qui se produisent dans les piles en sens contraire du co cipal, et le neutralisent en totalité ou en partie. M. B reconnu que ces courants sont engendrés par des dép font sur les lames zinc et cuivre des couples. En effet, qui va du zinc au cuivre, *dans la pile,* décomposant sulfate de zinc qui s'est formé, il se dépose, sur le cuiv quel marche le courant, non-seulement une couche de tant plus épaisse, que la pile est plus longtemps en acti des bulles d'hydrogène, qui restent adhérentes au méta séparent qu'après avoir atteint un volume assez consid là deux causes d'affaiblissement très-puissantes; car, le dépôt de zinc donne naissance à un courant de sens celui de la pile et le neutralisant plus ou moins, le gaz h qui est très-oxydable, donne lui aussi, en reformant de courant secondaire de sens contraire à celui du courant et de plus, par sa non-conductibilité, présente une gra tance à la circulation de l'électricité dans la pile.

Si l'on interrompt le circuit, les dépôts se dissolvent sité du courant augmente. On obtient le même résultat passer le courant d'une autre pile en sens contraire du

risées. M. Becquerel et Faraday ont fait voir que cette polarité est un effet des dépôts engendrés par les courants secondaires.

Les lames de platine qui ont servi à la décomposition de l'eau pure acquièrent aussi la polarité électrique, sans qu'on puisse l'attribuer à l'effet d'un acide ou d'une base; mais Matteucci a fait voir qu'elle provient alors d'une couche d'oxygène et d'hydrogène déposée respectivement sur chaque lame.

PILES CLOISONNÉES A DEUX LIQUIDES

753. **Objet des piles à deux liquides.** — Dans les piles décrites jusqu'ici, lesquelles sont connues sous le nom de *piles à un seul liquide*, les causes qui concourent à l'affaiblissement du courant sont la transformation de l'acide sulfurique en sulfate de zinc, et la décomposition de ce sel par le courant intérieur de la pile, avec dépôt de zinc et d'hydrogène sur les lames de cuivre. Or le double objet des piles à deux liquides est : 1° de s'opposer aux dépôts de zinc et d'hydrogène sur les lames de cuivre; 2° de conserver à l'acide de la pile toujours le même degré de concentration.

On arrive à ce double résultat en faisant usage de deux liquides susceptibles de réagir l'un sur l'autre. Ils sont séparés par une *cloison* qui laisse passer facilement le courant, mais ne permet pas au zinc d'aller se déposer sur le cuivre. Enfin, les deux éléments d'un même couple plongent, l'un dans un des liquides, l'autre dans l'autre. Les piles ainsi construites présentent une constance d'intensité remarquable, qui leur a fait donner le nom de *piles à courant constant*. La première pile à courant constant est due à M. Becquerel, en 1829. Depuis on a beaucoup varié la forme de ces piles; les plus en usage sont la pile de Daniell et celle de Bunsen. La pile de Daniell satisfait seule aux deux conditions ci-dessus; c'est vraiment la pile à courant constant; celle de Bunsen ne satisfait qu'à la première condition.

754. **Pile de Daniell.** — En 1836, le chimiste anglais Daniell construisit la pile qui porte son nom, et qui, avec la *pile à charbon* (757), est celle dont l'usage est le plus répandu aujourd'hui.

La figure 635 représente un couple ou un *élément* de cette pile, [illegible]t on a beaucoup varié la forme. Un vase V, de verre, est rempli [illegible]e dissolution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle [illegible]ge un cylindre de cuivre rouge C, percé latéralement de plu[illegible]s trous et ouvert aux deux bouts. A la partie supérieure de [illegible]lindre est fixée une galerie annulaire G, percée sur son pour[illegible] inférieur de petits trous qui plongent dans la disso[illegible] galerie est destinée à contenir des cristaux de su[illegible]

cuivre, qui se dissolvent à mesure que l'appareil fonctionne. Enfin, dans l'intérieur du cylindre C est un vase poreux, ou diaphragme P, de terre de pipe dégourdie, plein d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, ou d'une dissolution de sel marin, ou même d'eau pure; dans le liquide plonge un cylindre de zinc Z, ouvert aux deux bouts et amalgamé. Aux cylindres zinc et cuivre sont fixées par des vis de pression deux lames minces de cuivre *p* et *n*, qui forment les électrodes de la pile.

Tant que les deux électrodes ne communiquent pas entre elles, la pile est inactive; mais aussitôt que la communication est établie, l'action chimique commence : l'eau est décomposée, et l'acide sulfurique attaque le zinc, qui s'électrise négativement, tandis que l'eau acidulée s'électrise positivement (747). De celle-ci l'électricité positive se rend, à travers la cloison, dans la dissolution de sulfate, et enfin sur le cuivre C, qui devient ainsi le pôle positif. Quant à l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau, il est entraîné dans le sens du courant intérieur, et se rend dans la dissolution de sulfate de cuivre, dont il réduit l'oxyde et revivifie le cuivre, qui va former un dépôt sans adhérence sur le cylindre C. Par suite, la surface de celui-ci reste toujours identiquement la même, aucun dépôt d'hydrogène ne se faisant sur le cuivre. Enfin,

Fig. 635.

Fig. 636.

l'oxyde de zinc qui provient de la décomposition du sulfate de zinc par le courant intérieur ne passe pas au travers du vase poreux, et reste dans la dissolution même où plonge le zinc.

Pendant ce travail chimique, la dissolution de sulfate de cuivre

ıppauvrir rapidement; mais les cristaux placés dans la se dissolvant au fur et à mesure, le degré de concentra- constant. Quant à l'acide sulfurique rendu libre par la ition du sulfate de cuivre, il se porte, en même temps gène de l'eau, vers le zinc pour le transformer en sulfate; la quantité d'acide mise en liberté dans la dissolution est régulière, l'action de cet acide sur le zinc l'est aussi, lte un courant constant. Quant aux pôles, c'est l'électrode inc qui est négative, et celle fixée au cuivre qui est posi- ıme dans les piles déjà décrites.

d'un vase de terre poreuse, on prend aussi, pour la ıi sépare les deux dissolutions, une poche de toile à voi- baudruche. L'effet est d'abord plus puissant; mais les olutions se mélangent plus rapidement, ce qui l'affaiblit. ıl, les cloisons doivent être perméables au courant, mais autant que possible le mélange des deux liquides.

pile de Daniell, on obtient des effets constants pendant jours, et même pendant plusieurs mois, lorsqu'on a soin ver la dissolution de sulfate de cuivre à l'état de satu- ı ajoutant de temps en temps des cristaux de ce sel.

le à ballon. — Dans l'élément représenté dans la figure ristaux de sulfate de cuivre doivent être renouvelés as-

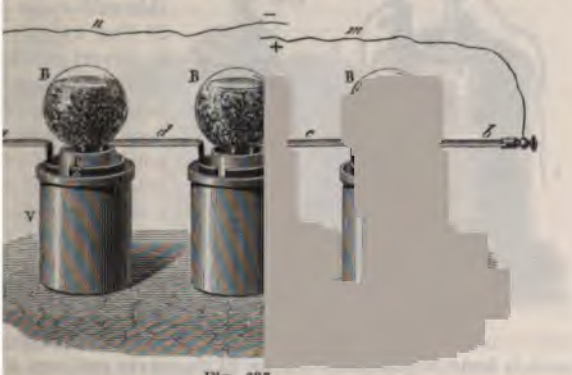


Fig. 637.

emment; de plus, l'évaporation s'opérant facilement, le zinc cristallise en grimpant sur les parois du vase po- ıui établit une conductibilité nuisible par-dessus la cloi- épare les deux liquides.

onvénients disparaissent dans la *pile à ballon*, adoptée

par M. Vérité. Dans un vase de faïence V (fig. 636) est de l'eau légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique, ou même de l'eau pure. Dans le liquide est un cylindre de zinc Z, puis un vase poreux P, rempli d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Dans cette dissolution plonge le goulot d'un ballon B rempli de cristaux du même sel et d'eau. Le goulot n'est fermé qu'en partie par un bouchon entaillé sur deux côtés. Par suite, aussitôt que le niveau baisse au-dessous du goulot, une bulle d'air entre dans le ballon et un volume égal de liquide saturé s'en écoule; d'où résulte un niveau constant. De plus, l'élément étant presque clos, l'évaporation est plus lente, et les cristaux grimpants moins abondants; aussi la pile marche-t-elle fort longtemps sans aucune surveillance.

Lorsqu'on fait usage d'eau pure au lieu d'eau acidulée, la pile n'a d'abord qu'une faible intensité au moment où l'on ferme le circuit. Il importe donc d'établir celui-ci assez longtemps avant de faire usage de la pile, 24 heures au moins.

La figure 637 montre une association en batterie de la pile à ballon. A chaque zinc, à partir du pôle positif, est soudée une lame de cuivre qui va plonger dans le vase poreux du couple suivant.

756. **Pile de Grove.** — Cette pile se compose : 1° d'un vase de verre A, en partie rempli d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique (fig. 638); 2° d'un cylindre de zinc Z, ouvert aux deux bouts et fendu dans toute sa longueur; 3° d'un vase poreux V, de terre de pipe peu cuite, et rempli d'acide azotique ordinaire; 4° d'une lame de platine P, recourbée en S (fig. 639), et fixée à un couvercle c qui se pose sur le vase poreux. Une borne métallique *b*, communiquant avec la lame de platine, porte un fil de cuivre qui sert d'électrode positive, tandis qu'un second fil fixé au zinc est l'électrode négative.

Fig. 638.

Fig. 639.

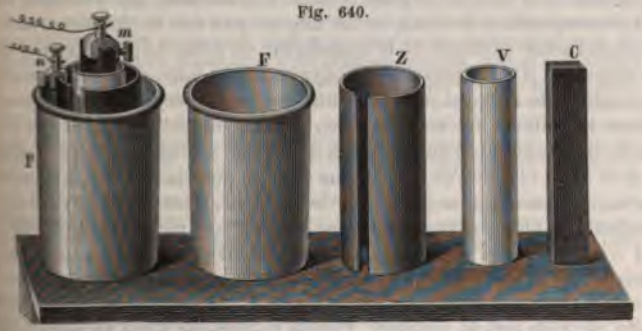
Cette pile est peu en usage, à cause du prix du platine. Ce métal présente en outre cet inconvénient que, lorsque la pile a fonctionné un certain temps, il devient cassant et se brise par le plus petit effort; toutefois M. Adam, professeur de physique à Nice, a observé qu'en chauffant au rouge les lames de platine de la pile

de Grove, elles reprennent leur élasticité. La théorie de la pile de Grove est la même que celle de la pile de Bunsen (757).

757. **Pile de Bunsen.**— La *pile de Bunsen*, ou *pile à charbon*, inventée en 1843, n'est autre chose que celle de Grove, dont la feuille de platine est remplacée par une plaque de charbon préparée en calcinant, dans un moule de tôle, un mélange intime de coke et de houille grasse, bien pulvérisé et fortement tassé.

Chaque élément de la pile à charbon se compose de quatre pièces pouvant se placer les unes dans les autres : 1° un bocal F (fig. 640), de grès ou de verre, plein d'une dissolution de 10 parties d'eau en volume pour une d'acide sulfurique ; 2° un cylindre creux Z, de zinc amalgamé ; 3° un vase poreux V, de terre de pipe peu cuite, dans lequel on met de l'acide azotique ordinaire ; 4° une plaque de charbon C, préparé comme il a été dit ci-dessus, et bon conducteur. Dans le vase F se place d'abord le zinc, puis le vase poreux, et au centre le charbon, comme on le voit en P. Au charbon on fixe une pince de cuivre *m* sur laquelle est une borne avec un fil de cuivre, qui, ainsi qu'on va le voir ci-après, est l'électrode positive ; au zinc est fixée une seconde pince *n* avec un fil, qui est l'électrode négative. Ce système de pinces est généralement usité aujourd'hui. Il est, en effet, préférable aux lames de cuivre sou-

Fig. 640.

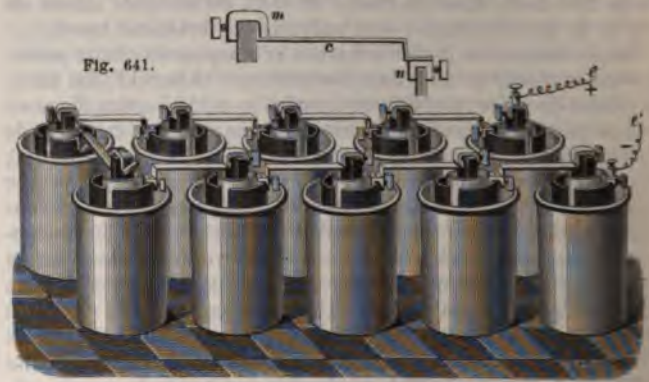


dées aux zincs dont on fit d'abord usage, leurs soudures étant promptement attaquées par les acides et par le mercure qui sert à l'amalgamation du zinc ; de plus, avec les pinces, on peut alternativement plonger le zinc par un bout ou par l'autre dans l'eau acidulée, et l'user ainsi également.

La pile est inactive tant que la communication n'est pas établie par un conducteur entre le zinc et le charbon ; mais dès qu'elle a lieu, l'action chimique commence. L'eau dans laquelle plo

zinc étant décomposée par ce métal et par l'acide sulfurique, avec formation de sulfate de zinc, ce métal s'électrise négativement (747) et devient le pôle négatif du couple; l'eau acidulée s'électrisant au contraire positivement, l'électricité positive passe, au travers du vase poreux, dans l'acide azotique, et de là sur le

Fig. 641.



charbon, qui devient le pôle positif. L'hydrogène qui provient de la décomposition de l'eau ne se dépose pas sur le charbon, mais réduit l'acide azotique et le transforme en acide hypoazotique, en s'emparant d'un équivalent d'oxygène pour faire de l'eau. Quant au sulfate de zinc qui se forme, une partie est décomposée, comme dans les piles à un seul liquide, par le courant intérieur, et ici cette décomposition donne lieu à de l'acide sulfurique qui se porte sur le zinc, et à de l'oxyde de zinc qui, ne pouvant passer à travers le vase poreux pour se porter sur le charbon, reste dans le vase extérieur. Le charbon conserve donc une surface parfaitement nette, et c'est là ce qui contribue surtout à conserver au courant son intensité. Toutefois trois causes d'affaiblissement existent encore. 1° Comme il n'y a toujours de décomposée qu'une portion du sulfate de zinc qui se produit, l'acide sulfurique libre va constamment en décroissant, cause d'affaiblissement qui n'existe pas dans la pile de Daniell. 2° L'acide azotique s'appauvrissant de plus en plus en oxygène, l'hydrogène tend à se déposer sur le charbon. 3° L'oxyde de zinc et les substances étrangères contenues dans ce métal, se portant sur le vase poreux, en obstruent les pores peu à peu et en diminuent la perméabilité pour le courant. De ces différentes causes il résulte que le courant s'affaiblit assez rapidement. Cependant, pour les courants dont le travail ne doit pas être

trop prolongé, la pile de Bunsen est la plus énergique des piles à deux liquides et celle dont l'usage est le plus répandu. Toutefois elle a l'inconvénient de répandre des vapeurs d'acide hypoazotique tout à fait incommodes lorsque les couples sont nombreux.

Pour réunir plusieurs couples, on les dispose comme le montre la figure 641, dans laquelle le charbon de chaque couple est relié au zinc du suivant au moyen de deux pinces *m*, *n*, et d'une lame de cuivre *c*, représentées au-dessus de la figure. La lame de cuivre est serrée d'un bout entre le charbon et la pince par une vis de pression, et de l'autre elle va se souder sur la pince *n* qui se fixe sur le zinc du couple suivant, et ainsi de suite d'un pôle à l'autre. La pince du premier charbon et celle du dernier zinc sont seules munies de bornes, desquelles partent les électrodes *e* et *e'*.

758. **Manipulation de la pile de Bunsen.** — La manipulation de la pile de Bunsen est longue, pénible, et demande à être faite avec soin, si l'on veut obtenir de la pile tout son effet.

On doit d'abord faire le mélange d'eau et d'acide sulfurique d'avance dans un seul vase, afin d'avoir exactement le même degré de concentration pour tous les couples. Ayant versé premièrement l'eau dans un baquet de bois, on ajoute un dixième, en volume, d'acide sulfurique ordinaire, de manière que la dissolution marque 10 à 11 degrés au pèse-acide de Baumé. Si l'on n'a pas de pèse-acide, l'eau est suffisamment acidulée quand elle devient tiède, et qu'une goutte déposée sur la langue ne peut y être conservée.

Quant aux couples, ils doivent être rangés à la suite les uns des autres sur une table ou un plancher bien sec, en ayant soin d'éviter qu'ils ne se touchent entre eux par aucune de leurs pièces autres que les lames et les pinces de cuivre qui unissent le zinc de chaque élément au charbon de l'élément suivant. On verse ensuite, avec un entonnoir, l'acide azotique dans les vases poreux jusqu'à deux centimètres du bord, puis on remplit de la même manière les pots extérieurs avec l'eau acidulée jusqu'à un centimètre du bord, ce qui établit à peu près l'égalité de niveau des deux liquides, condition essentielle pour la constance de la pile. Dès que l'acide azotique est versé dans les vases poreux, on doit introduire l'eau acidulée, afin de ne pas donner à l'acide azotique le temps de traverser ces vases et de venir attaquer les zincs.

Le bon établissement du contact étant indispensable pour qu'une pile fonctionne bien, on doit décaper avec soin, en les frottant avec du papier de verre, les lames de cuivre qui s'engagent dans les pinces, et maintenir propres les faces internes de ces dernières.

L'acide azotique, s'il est neuf, doit marquer 40° au pèse-acide, et peut servir jusqu'à ce qu'il ne marque plus que 26°. On y ajoute alors un cinquantième, en volume, d'acide sulfurique; mais après cette addition il ne peut servir qu'une fois. L'eau acidulée sert généralement deux fois, à moins que le sulfate de zinc formé ne commence à cristalliser.

[illegible] doit le plus observer pour conserver la pile en bon état, c'est l'a[illegible] des zincs (759). On reconnaît qu'un zinc a besoin d'être amalgamé [illegible] entendre un sifflement dans l'eau acidulée sans que la pile soit en [illegible] est fortement attaqué, on voit l'eau fumer et même bouillonner; dans [illegible] faut retirer le zinc, sinon quelques heures suffisent pour le trouer.

[illegible]malgamer les zincs, on les trempe quelques secondes dans l'eau acidulée [illegible] que celle de la pile), afin de les décaper; puis on les place un à un dans un [illegible] terre contenant un peu d'eau acidulée (deux fois plus que la première).

et deux kilogrammes de mercure environ qu'on étend sur le zinc à l'aide d'une brosse de fils de fer. Quand les zincs sont amalgamés, on les plonge dans un baquet d'eau, au fond duquel, après l'opération, on retrouve l'excès de mercure.

759. **Propriété du zinc amalgamé.** — M. de la Rive a observé que le zinc parfaitement pur n'est pas attaquable par l'acide sulfurique étendu d'eau, mais le devient si on le met en contact avec une lame de platine ou de cuivre plongée dans la dissolution. Le zinc ordinaire du commerce, au contraire, qui n'est pas pur, est vivement attaqué par l'acide étendu; mais, amalgamé, il acquiert la propriété du zinc pur, et n'est attaqué qu'autant qu'il se trouve en contact avec un fil de cuivre ou de platine plongeant aussi dans la dissolution, c'est-à-dire qu'autant qu'il fait partie d'un couple en activité.

On explique la vive action de l'acide sulfurique sur le zinc ordinaire par les substances étrangères qu'il renferme, lesquelles, étant plus ou moins attaquables que ce métal, présentent à sa surface des parties où la force électromotrice est inégale; de là des courants qui entretiennent l'action chimique.

La propriété du zinc amalgamé a été appliquée aux piles par Kemp, qui, le premier, a imaginé d'amalgamer les zincs de chaque couple. Il résulte de cette amalgamation que tant que le circuit n'est pas fermé, c'est-à-dire tant qu'il n'y a pas courant, le zinc n'est pas attaqué; d'où résulte une grande économie de métal. On observe, en outre, qu'avec le zinc amalgamé, le courant est plus régulier, et, en même temps, plus intense pour une même quantité de métal dissous.

* NOUVELLES PILES

760. **Pile au bichromate de potasse.** — De nombreuses modifications ont été apportées aux piles à courant constant : nous citerons surtout la *pile au bichromate de potasse* de Bunsen, la *pile au sulfate de mercure* de Marié-Davy, la *pile sans diaphragme* de Callaud, et la *pile à sable* de Minotto.

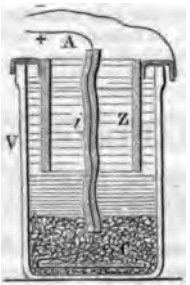
La pile au bichromate de potasse est de deux sortes : à deux liquides ou à un seul. Celle à deux liquides ne diffère de la pile à charbon décrite ci-dessus (fig. 640), qu'en ce que l'acide azotique du vase poreux est remplacé par la dissolution suivante : 900 gr. d'eau, 50 gr. de bichromate et 50 gr. d'acide sulfurique. On fait dissoudre à chaud le bichromate, puis on ajoute l'acide. Quant à l'eau du vase de grès, elle est acidulée au vingtième d'acide sulfurique. Cette pile offre le grand avantage de ne point répandre de vapeur d'acide hyponitrique; mais elle se polarise très-rapidement par un dépôt d'oxyde de chrome sur le zinc, et donne alors un courant peu intense.

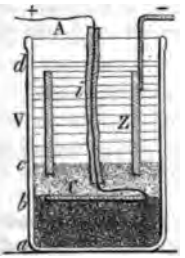
Dans la pile à un seul liquide, lequel est encore une dissolution de bichromate de potasse et d'acide sulfurique, le vase poreux est supprimé, et les couples sont composés de deux plaques de zinc, et, entre celles-ci, d'une plaque de charbon; toutes les trois sont fixées à un disque de caoutchouc durci et plongent dans le même vase. Cette pile se polarise très-rapidement; mais Ruhmkorff a observé qu'en réduisant la longueur des plaques de zinc à un quart ou à un cinquième de celle du charbon, la pile ne se polarise que lentement et peut fonctionner pendant 9 à 10 heures.

761. **Pile au sulfate de mercure.** — La pile au sulfate de mercure a reçu différentes dispositions. Celle généralement adoptée est identiquement la même que pour la pile de Bunsen quant aux pièces qui la composent, seulement avec des dimensions beaucoup moindres. De plus, dans le vase extérieur V (fig. 641), au lieu d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, on met de l'eau ordinaire ou une dissolution de chlorure de sodium; et dans le vase poreux, au lieu d'acide azotique, du bisulfate de protoxyde ou de bioxyde de mercure. Ce sel étant peu soluble, on le délaye à l'état pulvérulent dans trois fois son volume d'eau environ, puis on décante, et l'on a un résidu pâteux. Ayant d'avance mis le char-

ase poreux, on remplit les vides avec ce résidu, et l'on verse dessus 'on a décanté.

si disposée, l'action chimique ne se produit qu'autant que les deux unis par un conducteur. Alors, en considérant le cas où le vase contient que de l'eau, le zinc décompose celle-ci en s'oxydant lenis que l'hydrogène mis en liberté se rend dans le vase poreux, où yde de mercure. L'acide sulfurique qui devient libre se porte alors





42. Fig. 643. Fig. 644.

nant au mercure métallique, il se dépose sur le charbon, d'où il tombe ase poreux, où on le recueille quand la pile est épuisée. C'est là une portante, puisque ce même mercure peut ensuite servir à préparer de sulfate égale à celle qui a été décomposée. Une petite quantité du ercure dissous peut, à travers le vase poreux, se rendre sur le zinc; duit là qu'un effet utile, le mercure s'amalgamant avec ce métal. sulfate de mercure s'épuise rapidement quand elle fonctionne d'une inue; mais elle peut fonctionner pendant trois à quatre mois pour interrompus, comme ceux qui servent à faire marcher les télésonneries d'appartements, etc.

le Callaud. — Dans la pile de Daniell, les vases poreux, à la longue, le cuivre, ce qui diminue leur perméabilité. M. Callaud, à Nantes, inconvénient en supprimant le vase poreux et toute espèce de diaen n'obtenant la séparation des deux liquides que par leur diffésité et par le passage même du courant.

Callaud se compose d'un vase V de verre ou de faïence (fig. 643). est une plaque de cuivre C à laquelle est soudé un fil de cuivre A, de la pile par un enduit de gutta-percha *i*. Au-dessus de la plaque e de cristaux de sulfate de cuivre; puis on achève de remplir avec ; enfin, dans le liquide est immergé en entier un cylindre de zinc Z, des piles déjà décrites, mais d'une hauteur deux fois moindre. La ure du liquide se sature de sulfate de cuivre, tandis que la partie ste à peu près pure, les deux liquides étant maintenus séparés par e de densité et aussi par le passage du courant intérieur. Du reste, cette pile est la même que celle de la pile de Daniell.

Callaud est non-seulement d'une manipulation simple, mais elle notable économie de sulfate de cuivre, et fournit des courants conat deux mois, sans autre soin que d'ajouter un peu d'eau pour le qui se perd par l'évaporation; aussi est-elle généralement adoptée pour le service des télégraphes.

763. Pile de Minotto. — M. Minotto, à Turin, pour rendre la séparation des deux liquides plus complète, a ajouté à la pile de Callaud une couche de sable un peu gros ou de brique pilée *bc*, placée au-dessus du sulfate de cuivre *ab* (fig. 644), qui ici est réduit en poudre pour ne pas laisser passer le sable. La couche *bc* rend, en effet, la séparation des deux liquides plus complète ; mais elle présente au courant intérieur, dans la pile, une résistance d'autant plus grande, qu'elle est plus épaisse.

La pile Callaud et la pile Minotto sont substituées aujourd'hui à la pile de Daniell sur la plupart des lignes télégraphiques.

Il existe encore plusieurs espèces de piles nouvelles, telles que celles de Gaston Planté, de Duchemin, de Carré, de Delaurier, de Granet, de Trouvé, de Warren de la Rue, qu'il nous est impossible de donner ici.

CHAPITRE III

EFFETS DES COURANTS, LOIS DE L'ÉLECTROLYSE, GALVANOPLASTIE, DORURE ET ARGENTURE

764. Effets divers des courants. — Les effets de l'électricité dynamique se divisent en *effets physiologiques, calorifiques, lumineux, mécaniques, chimiques, magnétiques* et *induisants*. Ces effets diffèrent de ceux que présente l'électricité statique, en ce que ces derniers sont dus à une recomposition instantanée des deux électricités à forte tension ; tandis que les premiers résultent d'une recomposition lente et à tension beaucoup plus faible, lorsque les deux pôles de la pile sont réunis par un circuit conducteur. Par la continuité de la force qui les produit, les effets des courants sont beaucoup plus remarquables que ceux des machines électriques.

Les effets calorifiques et lumineux dépendent de la quantité d'électricité mise en mouvement dans la pile, et par conséquent de la surface des couples. Il importe donc de monter alors ceux-ci de manière à multiplier la surface, ce qui s'obtient en les disposant en plusieurs séries parallèles dont on réunit les pôles de même nom.

Les effets chimiques, au contraire, ainsi que les effets physiologiques, dépendent de la tension, et par suite du nombre des couples ; c'est pourquoi ceux-ci doivent être ici associés en une série longitudinale. Dans tous les cas, le maximum d'effet avec un nombre de couples donné s'obtient en les disposant de manière que la résistance intérieure de la pile égale celle du circuit extérieur que doit parcourir le courant (817). Enfin, tous les effets de la pile augmentent avec l'intensité de l'action chimique.

Faraday, qui a fait de nombreuses expériences sur les fils de cuivre revêtus de gutta-percha, a trouvé que les effets physiques et physiologiques produits par un courant qui passe dans des fils très-longs sont très-faibles, et même insensibles, quand les fils

sont dans l'air, et qu'au contraire les mêmes effets sont très-intenses lorsque les fils sont immergés dans l'eau ou plongés dans le sol. Faraday, qui expérimentait sur des fils de 160 kilomètres de longueur, explique ce phénomène en comparant le fil de cuivre recouvert de gutta-percha et entouré d'eau à un condensateur construit sur une grande échelle : explication qui est confirmée par les effets qui se produisent dans la transmission du flux électrique dans les câbles sous-marins (871).

EFFETS PHYSIOLOGIQUES

765. **Actions sur les nerfs et sur les muscles.** — On a vu que ces effets furent les premiers observés, puisque c'est à eux qu'est due la découverte de l'électricité dynamique par Galvani (734). Ils consistent en commotions et en contractions musculaires très-énergiques quand les piles sont puissantes.

En prenant dans les deux mains les électrodes d'une forte pile, on ressent une commotion violente, comparable à celle de la bouteille de Leyde, surtout si les mains sont mouillées d'eau acidulée ou salée, ce qui augmente la conductibilité. La commotion est d'autant plus intense, que les couples sont plus nombreux. Avec une pile de Bunsen de 50 à 60 couples, petit modèle, la commotion est forte; avec 150 à 200 couples, elle est insupportable, et même dangereuse. Elle se fait ressentir moins avant dans les bras que la commotion de la bouteille de Leyde, et transmise par une chaîne de plusieurs personnes, elle n'est ressentie que par celles qui sont plus rapprochées des pôles.

Les effets physiologiques des courants ne sont pas les mêmes sur les nerfs sensitifs, sur les nerfs moteurs et sur les muscles. Le courant agit sur les premiers seuls, il y a douleur; sur les seuls, il y a commotion; sur les muscles, il y a contraction; mais il faut alors un courant à plus forte tension.

Tous ces effets ne se font sentir qu'à la fermeture et à l'ouverture du courant, cessant aussitôt que le courant est invariablement établi, du moins s'il est peu intense; car avec des courants énergiques les commotions et les sensations persistent, la pile se déchargeant d'une manière continue en même temps que les électricités se réunissent par les muscles et par les nerfs; seulement elles sont beaucoup plus faibles qu'à la fermeture et à l'ouverture du circuit. Enfin, les effets des courants sur les nerfs varient suivant qu'ils se propagent dans le sens des ramifications nerveuses ou en sens contraire.

L'effet du courant, des lapins asphyxiés depuis une demi-

700. **Fusion et volatilisation.** — Un courant qui pa
métallique produit des effets analogues à ceux des ba
le fil s'échauffe, devient incandescent, fond ou se vol
qu'il est plus ou moins long et d'un diamètre plus o
Avec une pile puissante, tous les métaux sont fondus
dium et le platine, qui résistent au feu de forge le p
et ne sont fondus que par la flamme au gaz oxyl
charbon est le seul corps qui n'ait pu être fondu jus
pile. Cependant Despretz, avec une pile de 600 élém
sen, réunis en six séries parallèles, a porté des bagu
bon très-pur à une température telle, qu'elles se so
ramollies, et ont pu se souder ensemble; ce qui indi
mencement de fusion.

Dans les mêmes expériences, ce savant a transform
en graphite, et a obtenu, par une action assez prolong
globules de charbon fondu. Il a pu fondre en quelq
250 grammes de platine; en n'opérant que sur quelqu
une partie a été volatilisée.

Il suffit d'une pile de 30 éléments de Bunsen pour
latiliser avec rapidité des fils fins de plomb, d'étain
cuivre, d'or, d'argent, de fer et même de platine, a
étincelles diversement colorées. Le fer et le platine
une lumière d'un blanc éclatant; le plomb, avec une
purine; celles de l'étain et de l'or sont d'un blanc bl
du zinc est mêlée de blanc et de rouge; enfin, le cu

ı déjà remarqué (764) que les effets calorifiques dépendent e la quantité d'électricité que de la tension; en d'autres ı, ils dépendent plus de la surface des couples que de leur e. On parvient, en effet, à fondre un fil de fer fin avec un ›uple de Wollaston dont le zinc a $0^m,20$ sur $0^m,15$.

assage du courant à travers un liquide l'échauffe aussi, et ıt plus, que le courant est plus intense et que le liquide ins bon conducteur; mais les effets calorifiques des cou- ›ont plus difficiles à observer dans les liquides, ces corps une plus grande chaleur spécifique que les solides, et les i se produisent absorbant une grande quantité de chaleur . Par exemple, dans la décomposition de l'eau, on reconnaît lévation de température est moindre au pôle négatif, où le ; de l'hydrogène qui se dégage est double de celui de l'oxy- u'on recueille au pôle positif (776).

Lois de la chaleur produite par le passage des courants. — En ›sant, dans un courant, un fil métallique enroulé en spirale n tube de verre plein d'eau, faisant l'office de calorimètre, lle, en Angleterre, et M. Ed. Becquerel, en France, ont que le dégagement de la chaleur par le passage de l'élec- au travers des corps solides présente les lois suivantes :

a quantité de chaleur dégagée est en raison directe du le la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné.

ette quantité de chaleur est en raison directe de la résis- du fil au passage de l'électricité.

uelle que soit la longueur du fil, si son diamètre est con- t qu'il passe la même quantité d'électricité, l'élévation pérature est la même dans toute l'étendue du fil.

our une même quantité d'électricité, l'élévation de tem- re, en différents points du fil, est en raison inverse du u diamètre.

Cause de la chaleur dégagée dans la pile, travail correspon- — La chaleur qui se produit dans la pile est due à l'oxyda- zinc et à la combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique. e a fait voir qu'*elle est proportionnelle au nombre d'équi- de zinc consommés pour produire le courant*, celui-ci *nt pas de chaleur*, mais ne faisant que transporter dans rentes parties du circuit, proportionnellement à la résis- ı chaleur développée dans la pile par les actions chimiques. rmann et M. Fabre, qui ont vérifié la loi de Joule à l'aide calorimètre (403), ont constaté que la double action chi- le l'oxydation du zinc et de la combinaison avec l'acide ue de l'oxyde formé, dégage 18 796 calories (390) par équi-

valent de zinc dissous, et que ces calories se retrouvent intégralement dans le circuit de la pile, extérieur et intérieur.

L'action électromotrice dans la pile se traduisant en chaleur, et celle-ci pouvant toujours se convertir en travail (405), on a pu comparer la pile à une machine à feu, dans laquelle la combustion du zinc remplace celle du charbon, et capable de produire un travail déterminé, équivalent à la chaleur qui disparaît dans le circuit. En effet, M. Fabre ayant placé, dans un des moufles du calorimètre à mercure, une petite pile, et, dans l'autre, un très-petit moteur électro-magnétique (873) qu'on pouvait faire marcher à volonté, a trouvé que, tant que la machine était en repos, la chaleur dégagée dans la pile et dans tout le circuit était constamment de 18 796 par équivalent de zinc; mais que, la machine fonctionnant, le nombre de calories diminuait, et que la chaleur disparue était proportionnelle au travail effectué (406).

EFFETS LUMINEUX

769. **Arc voltaïque.** — La pile est, après le soleil, la source de lumière la plus intense. Ses effets lumineux se manifestent par des étincelles, par l'incandescence des substances qui réunissent les deux pôles, et par l'arc voltaïque.

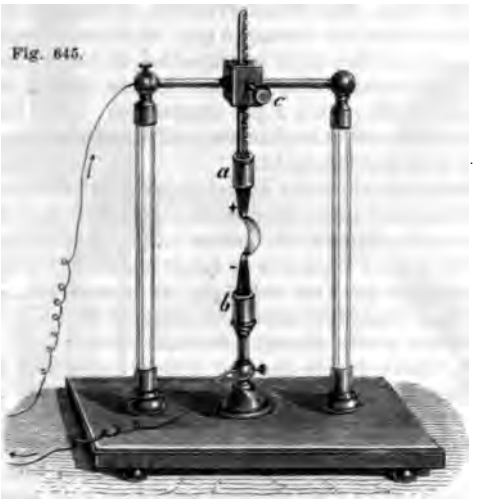
Les pôles d'une pile, à moins d'un nombre de couples considérable, possédant peu de tension, il ne se produit point d'étincelle quand on les réunit par un fil de cuivre; mais, à la rupture du circuit, une étincelle apparaît, d'autant plus forte, que les couples sont plus nombreux.

Par l'incandescence des conducteurs qu'ils traversent, les courants offrent des effets lumineux remarquables. Un fil de fer ou de platine, qui réunit les deux pôles d'une forte pile, et est assez gros pour n'être pas fondu, devient incandescent et jette un éclat tout le temps que la pile est en activité. Si le fil est enroulé sur lui-même en hélice, l'effet lumineux est augmenté (881).

Mais c'est surtout en faisant communiquer les électrodes par deux cônes de charbon de coke bien calciné qu'on obtient un effet de lumière électrique (fig. 645). Le charbon *b* est fixe, tandis que le charbon *a* s'élève ou s'abaisse plus ou moins à l'aide d'une crémaillère à laquelle il est fixé, et d'un pignon qu'on fait tourner à la main par un bouton *c*. Les charbons étant mis en contact, le courant passe et les rend aussitôt incandescents. Si on les écarte alors, il se produit de l'un à l'autre un arc lumineux d'une éblouissant, auquel on a donné le nom d'*arc voltaïque*.

La longueur de l'arc varie avec l'intensité du courant; dans

ut atteindre une longueur de 7 centimètres, avec une pile 00 couples disposés en six séries parallèles de 100 chacune, d le charbon positif est en haut; s'il est en bas, l'arc est plus t de près de 2 centimètres. Lorsque les charbons sont dispo- orizontalement, ils doivent être plus rapprochés, l'arc s'étei- t plus facilement; ce qui résulte de ce que le refroidissement



air est augmenté. Dans l'air très-raréfié, la distance entre les charbons peut devenir beaucoup plus grande; l'électricité, rencontrant qu'une faible résistance, s'élance des deux char- même avant qu'on les ait amenés au contact. L'arc voltaïque aussi se produire dans les liquides; mais il est alors beau- moins long, et son éclat est bien affaibli.

sque, le courant ne passant pas encore, on rapproche les ons pour l'établir, on remarque que c'est sur le charbon néga- 'apparaît d'abord la lumière; puis le charbon positif s'échauf- avantage (766), c'est ensuite lui qui présente le plus vif éclat. rc voltaïque jouit de la propriété, lorsqu'on lui présente un imant, d'être dirigé par celui-ci, ce qui est une conséquence ction des aimants sur les courants (830).

st Davy qui, le premier, à Londres, en 1801, fit l'expérience lumière électrique à l'aide de deux cônes de charbon et d'une auges de 2 000 couples dont les plaques avaient près de ntimètres de côté. Davy faisait usage de charbon de bois lé-

ger, éteint à l'état incandescent dans un bain de mercure, qui, en pénétrant dans les pores du charbon, en augmentait la conductibilité. Comme le charbon de bois brûle très-vite à l'air, on était obligé d'opérer dans le vide; c'est pourquoi l'expérience de la lumière électrique a longtemps été faite en plaçant les deux cônes de charbon dans l'œuf électrique (fig. 615). Aujourd'hui qu'on fait uniquement usage, dans ces expériences, de charbon de coke provenant des résidus des cornues à gaz, ce charbon, qui est dur et compacte, et peut être taillé en baguettes, ne brûle que lentement à l'air, ce qui dispense d'opérer dans le vide. Quand l'expérience se fait dans le vide, il n'y a pas combustion, mais les charbons s'usent encore, surtout le charbon positif, qui s'use deux fois plus vite à peu près que le négatif.

L'éclairage électrique est utilisé aujourd'hui dans les théâtres, dans les fêtes publiques, dans les ateliers, dans les phares; [illegible] 80 à 100 couples Bunsen, on obtient un puissant éclairage; [illegible] son prix de revient l'emporte de beaucoup sur l'éclairage au gaz.

770. **Transport par l'arc voltaïque, sa constitution.** — Lorsque l'arc voltaïque se produit entre deux cônes de charbon, on observe que le charbon positif décroît lentement, même dans le vide, et se creuse, tandis que le charbon négatif augmente; il y a donc transport des molécules de charbon du premier pôle au second. Si, au lieu de se former entre deux charbons, l'arc se forme entre deux métaux différents, cuivre et argent par exemple, on reconnaît, par les dépôts qui se produisent, qu'il y a transport dans les deux sens; mais c'est du pôle positif au pôle négatif que le transport est plus abondant.

La haute température qu'atteignent les charbons au moment où on les met en contact, puis le transport qui se produit lorsqu'on les sépare, montre que l'arc voltaïque est dû aux molécules de charbon volatilisées, puis transportées d'un pôle à l'autre. Elles forment une chaîne continue qui suffit pour fermer le courant, mais cette chaîne, présentant une grande résistance, s'échauffe d'après la deuxième loi de la distribution de la chaleur dans le circuit (767), jusqu'à produire le vif éclat qui constitue l'arc.

C'est par suite de cette résistance qu'on ne peut obtenir l'arc qu'avec un grand nombre de couples, 40 Bunsen au moins, disposés en une seule série. C'est par la même cause que l'écart entre les deux charbons a une limite au delà de laquelle l'arc s'éteint. On le fait naître de nouveau, en rapprochant les charbons jusqu'au contact, ou en faisant passer de l'un à l'autre une forte étincelle électrique. Plus les électrodes sont facilement désagrégées par le courant, plus on peut les écarter sans éteindre l'arc.

on, qui est une substance très-friable, est un des corps qui nt l'arc voltaïque le plus long.

. **Projection des deux charbons.** — On doit à Foucault une expérience qui consiste à projeter, à l'aide de lentilles, l'image ines de charbon sur un écran, dans la chambre noire, au

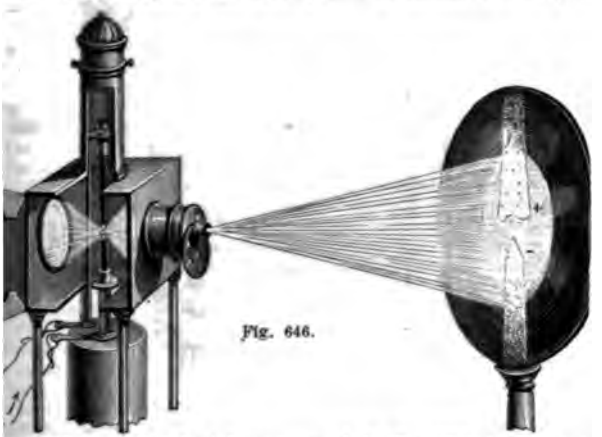


Fig. 646.

nt où la lumière électrique se produit (fig. 646). Cette expé-, qui se fait au moyen du microscope photo-électrique déjà (fig. 491, page 537), met à même de distinguer très-bien ux charbons incandescents, et l'on voit le charbon positif user et diminuer, tandis que l'autre augmente. Quant aux es représentés sur les deux charbons, ils proviennent de la d'une petite quantité de silice contenue dans le coke dont arbons sont formés.

. **Régulateur de la lumière électrique de Foucault.** — La lumière que l'arc voltaïque présente l'inconvénient de ne pas conserver la continuité qu'on rencontre dans les autres lumières; ce qui tient à ce que les char-sant rapidement, l'intervalle qui les sépare augmente de plus en plus, suite, l'intensité du courant décroît. Pour obvier à ce défaut, on s'est ent attaché d'abord à construire des régulateurs qui, mus par le cou-même, n'ont d'autre fonction que de rapprocher les charbons à mesure usent. La lumière ainsi obtenue n'est pas complétement régulière. En s charbons, n'étant jamais parfaitement purs, contiennent des matières es et notamment de la silice qui, sous l'influence de la haute tempéra-arbons, entrent en fusion et forment, à l'extrémité de ceux-ci, un qui en diminue l'intervalle, ce qui augmente l'éclat.

, le premier, construisit un régulateur qui rapprochait les charbons. e même savant a inventé un nouveau régulateur extrêmement sen-duit successivement le rapprochement et l'écart des charbons aussi-distance varie de la quantité la plus faible.

La figure 647 en donne une vue d'ensemble, et les figures 648, 649 et 650 en montrent les détails. L'appareil se compose d'une boîte de laiton PQ, dans laquelle sont deux mouvements d'horlogerie, tendant, l'un à rapprocher les charbons, l'autre à les écarter. Au-dessus de la boîte sont les deux charbons, le

Fig. 647.

Fig. 648.

positif fixé à une tige mobile G, et le négatif porté par une tige I qui glisse à frottement doux dans une douille L. Les deux mouvements, qui se montent avec les boutons B et D, arrêtent à la fois les deux charbons, ou n'en laissent marcher qu'un seul. Enfin, au-dessous de la boîte est l'appareil dans lequel passe le courant, et qui sert de régulateur aux mouvements d'horlogerie.

Représenté plus en grand dans la figure 648, il se compose d'abord d'un électro-aimant E dans lequel passe d'une manière continue le courant. Au-dessus de l'électro-aimant est une armature de fer doux A, fixée à l'extrémité d'un levier F, mobile autour d'un axe O. Cette armature jamais en contact avec l'électro-aimant, mais s'en rapproche d'autant que les charbons sont moins écartés, c'est-à-dire que le courant est plus Au-dessus du levier F en est un second C, dont le point d'appui est qui est constamment entraîné de haut en bas par un ressort à boudin à son extrémité.

vier C étant courbe sur sa face inférieure, cette courbure en fait un résistance variable, dont Robert Houdin a, le premier, indiqué l'usage, lonne ici à l'appareil une extrême sensibilité. En effet, l'armature A, sans cesse à s'abaisser par l'attraction de l'électro-aimant, est en même ollicitée de bas en haut par le bras de levier F, qui est constamment à s'abaisser par la pression du ressort *r* que lui transmet le levier C. oint d'application de cette pression varie à mesure que le levier F s'in- ans le dessin (fig. 648), le point d'appui est en *a;* mais si l'armature tant soit peu, il passe en *a'*. Le bras de levier *ac*, sur lequel agit le *r*, augmente donc aussitôt que l'armature A s'abaisse. En résumé, l'in- du courant et, par suite, le pouvoir attractif de l'électro-aimant crois- résistance en sens contraire croît en même temps. De là une oscillation elle, mais dans des limites très-resserrées, du levier F.

levier est fixée une pièce D, sur laquelle s'élève une tige K, qui parti- c D aux oscillations du levier. La tige K se termine par une pièce H qui , à droite et à gauche, avec des dents *s*, *s'*, fixées sur les axes de deux ignons, axes qui portent en outre des ailettes *u* et *v* recevant une ro- apide des roues R et R' mues par les deux mouvements d'horlogerie. Ces , par la résistance qu'elles rencontrent dans l'air, sont destinées à ra- mouvement et à le régulariser. Lorsque la tige K incline à droite, l'*em-* H bute contre la dent *s*, l'arrête et avec elle tout le mécanisme de droite. gauche marche alors seul, et les charbons se rapprochent. Si, au con- l'embrayeur incline à gauche, il arrête *s'* et tout le mécanisme de gauche. dui de droite qui fonctionne maintenant, et les charbons s'écartent. lorsque la tige K est verticale, l'embrayeur arrête à la fois les deux mes, et les charbons sont fixes. Les oscillations de l'armature étant tou- ès-petites, il en est de même de celles de l'embrayeur, et, par suite, les s n'avancent et ne reculent qu'infiniment peu avec les variations du ; ce qui procure, à la fois, une grande fixité du point lumineux et de e la lumière.

compléter la description de l'appareil, il reste à décrire le mécanisme ismet un mouvement alternativement de sens contraire aux charbons.

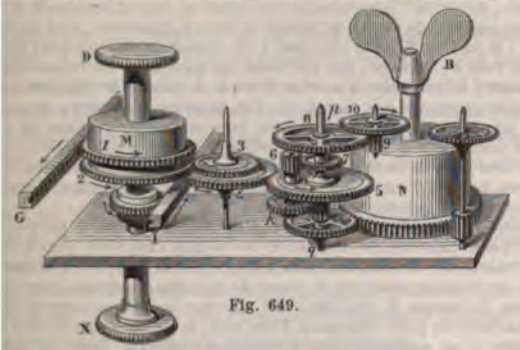


Fig. 649.

ils et la marche en sont représentés dans les figures 649 et 650, dans s les flèches indiquent le sens de la rotation des roues, et les numéros .. l'ordre dans lequel elles se mènent. Deux barillets M et N font suc- ent marcher les rouages. Le barillet N est le plus puissant, et assez pour l'autre. L'arbre du barillet M (fig. 649) porte trois roues : la roue su-

un pignon 6 et au-dessous une petite roue *k*. La roue satellite,
roue 4, entraîne autour de l'axe *pq* le pignon 6, lequel met en
roue 7 et en même temps la roue 8 qui est liée avec elle. Puis la
le pignon 9 et la roue 10, et enfin cette dernière, par deux pignons
qui ne sont pas représentés dans le dessin, transmet le mouvemen
et à l'aiette *v* (fig. 648).

Dans le mécanisme qui vient d'être décrit, le barillet N reste fi
M fonctionne seul, et les engrenages intermédiaires n'ont d'autre

Fig. 650.

transmettre une grande vitesse à l'aiette *v*. Dans la figure 650, c'e
qui a lieu : le barillet N porte une roue 1 qui transmet le mouvem
o et à une roue *h*, laquelle, par une suite de pignons et de rou
dans le dessin, le transmet à la roue R et à la palette *u* (fig.
même barillet, toujours par la roue 1, fait marcher la roue 2 ;
tourne le pignon 3 qui lui est lié, lequel imprime autour de l'a
vement de translation à la roue 4. Or celle-ci, étant liée à la ro
l'entraîne avec elle ; en sorte que c'est la roue satellite qui fait ma
6 et 7 ; puis la roue 7 mène enfin le barillet M, qui maintenant
sens contraire, fait écarter les charbons.

La marche du courant est indiquée par les flèches (fig. 647).
borne *y*, il passe dans l'électro-aimant E, de là dans l'appareil, p

[redacted]

[illegible]mière solaire : elle détermine la [illegible] [illegible]lore et d'hydrogène, agit chimiquement [illegible], appliquée à la photographie, donne de [illegible] [illegible]marquables par la chaleur des tons; [illegible] [illegible]plicable pour le portrait, parce [illegible] [illegible]. Hervé-Mangon a observé que la [illegible] [illegible]veloppe sous l'influence de la lumière [illegible] [illegible]s celle de la lumière solaire.

Transmise au travers d'un prisme, [illegible] [illegible] spectre, de même que la lumière [illegible] [illegible] est pas simple. Wollaston et [illegible] [illegible] la lumière électrique diffère de [illegible] [illegible] présence de plusieurs raies très-[illegible] [illegible]lier, qui se trouve dans le vert, [illegible] [illegible]te en comparaison du reste du spectre. [illegible] [illegible]'en se servant, pour électrodes, [illegible] [illegible] les raies sont modifiées; résultat [illegible] [illegible]rlant de l'analyse spectrale [illegible] [illegible] la position des raies brillantes [illegible] [illegible]tensité du courant.

Avec des électrodes de charbon, [illegible] [illegible] nombre et leur éclat; avec le zinc, [illegible] [illegible] une teinte vert-pomme très-[illegible] [illegible] très-intense; avec le plomb, [illegible] [illegible]ne; et ainsi de suite avec les différents métaux.

Quant à l'intensité de la lumière électrique, Bunsen, en [illegible]mentant avec 48 couples, et en éloignant les charbons de 7 [illegible]limètres, a trouvé qu'elle équivalait à celle de 572 bougies. [illegible]s cette expérience a été faite avec des couples dans lesquels le [illegible]rbon était extérieur et le zinc intérieur; et ces couples avaient [illegible] effets beaucoup moindres que ceux dans lesquels le charbon [illegible] intérieur. Par conséquent, la lumière de 48 de ces derniers [illegible]ples équivaut à plus de 572 bougies.

[illegible]oucault et M. Fizeau, qui ont cherché à comparer la lumière [illegible]trique à la lumière solaire, n'ont pas comparé les quantités [illegible]umière versées par ces deux sources, mais leurs effets chimi[illegible] sur l'iodure d'argent des plaques daguerriennes. Les résul[illegible] obtenus ne font donc pas connaître l'intensité optique de la [illegible] électrique, mais son intensité chimique.

[illegible]présentant par 1000 l'intensité de la lumière solaire à [illegible]oucault et M. Fizeau ont trouvé que celle de la lumière de [illegible]es Bunsen (à charbon intérieur) est représentée par 235, [illegible] le 80 couples, seulement par 238. Il résulte de ces [illegible]

portes à une certaine intensité. La lumière de 100 c
dit-il, donner des maux d'yeux très-douloureux. Avec
instant suffit pour que la lumière occasionne des ma
d'yeux très-violents, et la figure est brûlée comme
coup de soleil. C'est pourquoi il est indispensable,
expériences, de porter des lunettes à verres d'un ble

EFFETS MÉCANIQUES

774. **Transports mécaniques par les courants.** —
électrique qui constitue les courants (740), il y a tra
le sens de leur direction, de matière pondérable. P
dans la formation de l'arc voltaïque (770), on a vu qu
port des molécules de charbon du pôle positif au p
c'est là un effet mécanique.

Le transport des liquides par les courants fut obs
première fois par Porret. Ayant divisé un vase de ve
compartiments par une cloison perméable consistant
brane de vessie, il versa de l'eau au même niveau d
compartiments, et y plongea deux électrodes de platine
nication avec les pôles d'une pile de 80 couples. En
que l'eau était décomposée, une partie du liquide fut
à travers la membrane, du compartiment positif au co
négatif, où le niveau s'éleva. Cette expérience ne réu
de l'eau qui tient en dissolution un sel ou un acide,

support formé de deux plaques de cuivre articulées. La plaque inférieure est fixe, et l'autre s'élève ou s'abaisse d'un bout au moyen d'une vis de rappel *n*; en sorte que le niveau du tube se règle par le globule même.

Dès qu'on plonge dans l'eau des branches verticales du tube les deux électrodes d'une pile de 4 ou 5 éléments de Bunsen, le globule de mercure s'allonge et avance du pôle positif vers le pôle

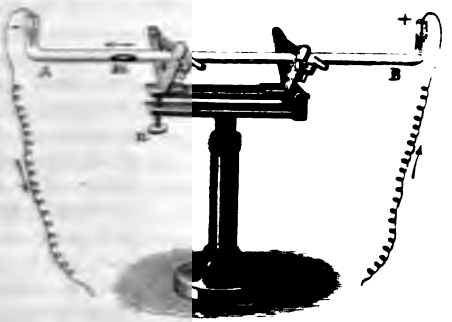


Fig. 651.

négatif avec une vitesse qui croît avec le nombre des éléments. Avec 24, on fait marcher une longue colonne de mercure dans un tube d'un mètre de longueur; avec 50, la vitesse devient assez grande pour que le mercure se divise en globules, allant tous dans le même sens. Lorsqu'on intervertit le sens du courant, le mercure s'arrête, puis marche en sens contraire.

Quand on incline lentement le tube vers l'électrode positive, le mercure est encore entraîné dans le sens du courant. Si l'on continue, il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force impulsive du courant et le poids du mercure. La composante de ce poids, parallèlement au tube, peut alors, abstraction faite des résistances, représenter l'action mécanique du courant qui traverse le globule de mercure.

Dans ces expériences, l'effet mécanique des courants peut s'expliquer par la résistance qui se produit à la surface de séparation du mercure et de l'eau par suite de la différence de conductibilité électrique; mais on pourrait aussi l'attribuer au flux électrique du pôle positif au pôle négatif (740).

EFFETS CHIMIQUES ET LOIS DE L'ÉLECTROLYSATION

Décomposition de l'eau, électrolysation. — On a remarqué que les effets chimiques de la pile dépendent plutôt du nombre

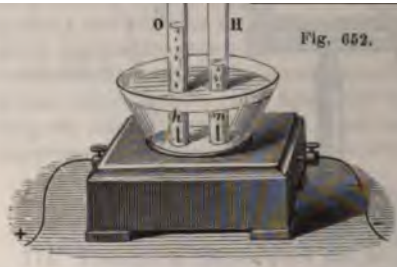


Fig. 652.

très-lente
l'eau pure
conductric
qu'un cour
figure 65
l'appareil
sert pour
l'eau par l
cueillir l
l'hydrogèn
gagent. Il
d'un vase conique de verre, mastiqué dans un pied
fond de ce vase s'élèvent deux fils de platine *h* et *n*
nication avec deux bornes de cuivre, fixées sur les
pareil et destinées à recevoir les électrodes de la
avoir rempli le vase d'eau légèrement acidulée, on
fils de platine deux cloches pleines d'eau, puis on é
rant. Aussitôt l'eau est décomposée en oxygène et
qui se dégagent dans les cloches. On vérifie alors
positive se remplit d'oxygène, et la cloche négative
de plus, le volume de ce dernier gaz est double du p
expérience donne donc à la fois l'analyse qualitativ
quantitative de l'eau.

Les substances qui, comme l'eau, sont décomposé
rant, et dont les éléments sont complétement séparé
Faraday le nom *d'électrolytes;* et il a appelé *électro*

[redacted]

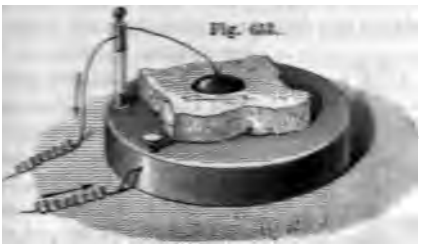
[illegible] pour la décomposition de l'eau [illegible]
[illegible] de même que
[illegible] 1792 sert à mesurer l'intensité des courants
le voltamètre peut servir à mesurer celle des courants
par la quantité de gaz recueillie dans les cloches dans
[illegible] car l'expérience montre que cette quantité est
[illegible] à l'intensité du courant.
[illegible] du voltamètre, on a pris pour *unité d'intensité des*
[illegible] du courant qui dégage, en 1 minute, 1 *gramme d'hy-*
[illegible] *l'intensité d'un courant se mesure par le poids*
[illegible] *qu'il fait dégager dans le voltamètre en 1 minute.*
[illegible] *équivalent électrique ou quantité d'électri-*
[illegible] *pour décomposer 1 équivalent d'eau.*
[illegible] applications du voltamètre, il importe d'observer que
[illegible] de gaz qui se produit, dans un même voltamètre, par
[illegible] de l'eau, ne dépend pas seulement de l'inter-
[illegible] mais encore du degré d'acidité de l'eau, de la na-
[illegible] la grandeur et de la distance des fils ou des lames qui
[illegible] dans le liquide pour lui transmettre le courant. On doit
[illegible] soin d'employer toujours le même appareil, ou des ap-
[illegible] identiques, sinon les résultats ne sont pas comparables.
[illegible] de l'action électrolysante des courants. — 1° Si l'on
[illegible] la suite les uns des autres une série de voltamètres, et
[illegible] traverser par un même courant, on observe que le
[illegible] hydrogène recueilli dans chacun est le même, et cela quelles
[illegible], dans les différents voltamètres, la matière et la dis-
[illegible] électrodes, la proportion et la nature de l'acide. Ce qui
[illegible] *l'intensité du courant est la même dans tout le cir-*
[illegible] *teur de la pile d'un pôle à l'autre.*
[illegible] disposant, au-dessus des couples mêmes de la pile, des
[illegible] manière à recueillir l'hydrogène dégagé, Daniell a re-
[illegible] la quantité de gaz recueillie est la même que dans les
[illegible] extérieurs. D'où l'on conclut que *l'intensité du cou-*
[illegible] *intérieur de la pile, est la même qu'à l'extérieur.*
[illegible], au lieu de faire passer le courant dans deux voltamètres
[illegible], si on le fait passer dans deux voltamètres parallèles,
[illegible] si l'électrode partant du pôle positif se bifurque en
[illegible] rendant séparément à deux voltamètres identiques et
[illegible] ensuite en un fil unique qui aboutit au pôle négatif,
[illegible] dans chaque voltamètre des quantités d'hydrogène
[illegible] elles; de plus, chacune est exactement la moitié, en
[illegible], du gaz obtenu quand le courant passe tout e
[illegible] deux voltamètres. Donc *le poids de l'eau* [illegible]

En disposant à la suite les unes des autres des dissolu différentes, et en les réunissant par des fils de plat a constaté que lorsqu'un courant passe dans tout le poids du métal qui se dépose sur les fils négatifs, dissolution, est proportionnel à l'équivalent du m d'où cette loi connue sous le nom de *loi de Faraday* *même courant agit simultanément sur une suite de* *les poids des éléments séparés dans chacune d'elles* *même rapport que leurs équivalents chimiques.*

Ou bien, au lieu de faire passer le courant simulta une série de dissolutions différentes, on le fait pas dissolution unique d'acide chlorhydrique, ou d'un se réunie par un fil de platine à un voltamètre à eau o lorsqu'un équivalent d'eau a été décomposé dans trouve qu'un équivalent d'hydrogène ou de métal s' le fil négatif dans la dissolution. C'est le même rés dessus; mais comme on a pris, pour équivalent é quantité d'électricité qui décompose un équivalent on voit qu'on peut donner de la loi de Faraday cet a *Quel que soit l'électrolyte qu'il traverse, toujours* *électrique en décompose un équivalent.*

L'intensité du courant étant la même dans toutes l circuit, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de la pile marquer que ce n'est pas seulement dans la dissolu sée dans le circuit extérieur que la loi de Faraday es

, le premier, en 1807, décomposa la potasse en en sou-
n morceau humide à un courant de 250 couples. Au pôle
rendit l'oxygène, et au pôle négatif un métal nouveau,
le potassium. Il obtint de la même manière le sodium;
métaux, à cause de leur grande affinité pour l'oxygène,
l'air à mesure qu'ils deviennent libres, il est préférable
comme Seebeck l'a fait depuis. Dans un fragment de po-
pratique une cavité qu'on remplit de mercure; puis, à



ne plaque métallique sur laquelle on la pose, on fait com-
la potasse avec le pôle positif d'une forte pile (fig. 653),
ure avec le pôle négatif. Le potassium, se portant alors
ercure, s'amalgame avec lui sans brûler. En distillant
et amalgame dans l'huile de naphte, on a pour résidu le
. On opère de la même manière avec la soude.
cides sont décomposés de même que les oxydes, et tou-
ygène se porte au pôle positif et le radical au pôle négatif.
cides le sont aussi; mais leur radical se porte au pôle
l'hydrogène au pôle négatif.
éral, les composés binaires métalliques, tels que les
, les iodures, les bromures, se comportent de la même
ous l'action des courants : le métal se rend au pôle né-
le chlore, l'iode, le brome, au pôle positif. Ces compo-
pour la plupart peu conducteurs de l'électricité à l'état
est à l'état de dissolution, ou à l'état de fusion, qu'il
oumettre à l'électrolyse.
aux composés binaires non métalliques, comme le sul-
arbone, le chlorure de soufre, n'étant pas assez conduc-
r transmettre le courant, ils ne peuvent être électrolysés
de mélange.
dans toute électrolysation, il n'apparaît aucune trace de
ition d'un pôle à l'autre; ce n'est qu'au contact même
odes que la séparation des éléments du corps électro-

lysé se manifeste. On verra ci-après (783) comment on explique ce phénomène dans la théorie de Grotthuss.

781. **Décomposition des sels ternaires.** — Les sels ternaires en dissolution sont tous décomposés par la pile, avec des effets qui varient suivant les affinités chimiques, mais qui, en réalité, sont toujours soumis à la même loi de décomposition.

Avec les métaux des quatre dernières sections, l'acide du sel et l'oxygène de l'oxyde se rendent au pôle positif, et le métal seul au pôle négatif.

Avec les métaux des deux premières sections, c'est-à-dire avec les métaux alcalins et les métaux terreux, qui ont une grande affinité pour l'oxygène et décomposent l'eau à la température ordinaire, la décomposition des sels paraît suivre une autre loi. En effet, l'acide du sel se portant encore au pôle positif, c'est l'oxyde du sel, et non le métal seul, qu'on recueille au pôle négatif; mais il y a en même temps dégagement d'oxygène au pôle positif et d'hydrogène au pôle négatif.

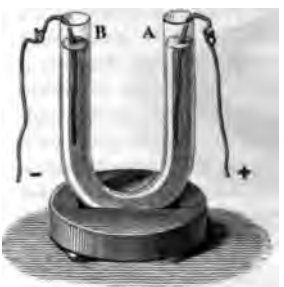


Fig. 654.

Daniell, qui, le premier, remarqua ce dégagement de gaz, en a conclu que, dans les sels des deux premières sections, de même que dans ceux des dernières, l'oxyde étant encore décomposé, son oxygène se porte avec l'acide au pôle positif, et le métal seul au pôle négatif; mais que là, en vertu de sa grande affinité pour l'oxygène, le métal décompose l'eau en s'emparant de son oxygène, et reproduit ainsi l'oxyde qui se décompose, tandis que l'hydrogène se dégage.

On peut donc poser cette loi générale sur la décomposition des sels ternaires par la pile : *Toujours le métal du sel se rend au pôle négatif, tandis que l'acide et l'oxygène de l'oxyde se rendent au pôle positif.* Par exemple, avec le sulfate de cuivre, on a $SO^3,CuO+HO=SO^4+Cu+HO$; et avec le sulfate de potasse $SO^3,KO+HO=SO^4+K+HO$; mais, par suite de la décomposition de l'eau par le potassium, le second membre de cette dernière égalité se change en SO^4+KO+H.

On démontre la décomposition des sels par la pile avec un tube de verre recourbé (fig. 654), dans lequel on verse une dissolution de sulfate de potasse ou de soude, colorée en bleu avec du suc de violette. Ayant plongé dans les branches du tube deux lames de platine, on met celles-ci en communication avec les électrodes

au bout de quelques minutes, si l'on fait usage de re couples de Bunsen, la branche positive A se colore la négative B en vert; ce qui montre que l'acide du é au pôle positif, et le métal alcalin oxydé au pôle on sait que le sirop de violette a la propriété de rou- on des acides, et de verdir par celle des bases.

osition des sels par la pile a reçu d'importantes ap- ns la galvanoplastie, la dorure et l'argenture (785).

secondaires dans l'électrolyse. — Dans plusieurs cas, dans les dissolutions salines, pendant l'électrolyse, qu'on désigne sous le nom d'*effets secondaires*, et citer les exemples suivants :

sels à base de potasse ou de soude, on vient de voir qui se rend au pôle négatif, décomposant l'eau et son oxygène, apparaît à l'état d'oxyde au pôle né- un effet secondaire, puisqu'il ne se produit qu'après ion du sel.

sels dont l'oxyde peut prendre un plus haut degré comme les sels de protoxyde de fer, l'oxygène mis en le positif suroxyde la base du sel, et celui-ci passe at de sel de peroxyde.

nature des électrodes donne lieu à des effets secon- ants : par exemple, avec les sels de cuivre, si l'élec- est elle-même de cuivre, l'oxygène qui s'y dégage à t l'attaque en formant de l'oxyde de cuivre; puis combinant avec l'acide sulfurique qui se rend au eproduit une quantité de sulfate précisément égale été décomposée. Le premier effet est la décomposi- e de cuivre, et le second est la reproduction d'une du même sel. On verra ci-après l'application de ce dans la galvanoplastie, la dorure et l'argenture.

ie de Grotthuss, sur les décompositions électro-chimi-
huss a donné, des décompositions électro-chimiques théorie suivante. Adoptant d'abord l'hypothèse que, posé binaire, ou se comportant comme tel, un des électro-positif, et l'autre électro-négatif (748), ce que, sous l'influence des électricités contraires des la pile, il se produit dans le liquide où elles plon- e de décompositions et de recompositions succes- e à l'autre, en sorte qu'il n'y a que les éléments des rêmes qui, ne se recomposant pas, restent libres et pôles. L'eau, par exemple, étant formée d'un atome de deux atomes d'hydrogène, et le pre

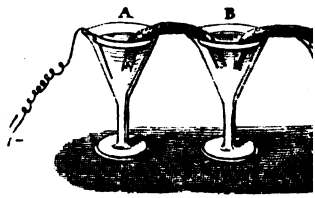
médiaten

Fig. 655. gène de

b, puis l'hydrogène de celle-ci à l'oxygène de la m
ainsi de suite, jusqu'au pôle négatif, où les derniers
drogène restent libres et se dégagent. La même théor
aux oxydes métalliques, aux acides et aux sels; e
toutes les décompositions électrolytiques.

784. Transports électro-chimiques par les courants
décompositions électro-chimiques, il n'y a pas seuleme
des éléments, mais transport des uns au pôle positif,
au pôle négatif. Ce phénomène a été démontré par l
de nombreuses expériences; nous citerons les deux

1° Ayant versé une dissolution de sulfate de sou
capsules réunies par une mèche d'amiante humecté
dissolution, on plonge l'électrode positive dans une
et l'électrode négative dans l'autre. Le sel est alors d
au bout de quelques heures, tout l'acide sulfurique s
la première capsule,
et la soude dans la
seconde.



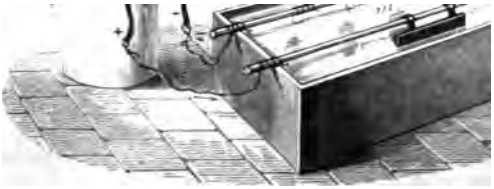
2° Trois verres A,
B, C (fig. 656), contenant, le premier
une dissolution de
sulfate de soude, le

ette du verre B n'est ni rougie ni verdie par le passage de ou de la base dans sa masse, phénomène qui s'explique, la théorie de Grotthuss, par les décompositions et les re- itions qui s'opèrent successivement de molécule à molé- n sorte que le vase B est toujours à l'état neutre.

GALVANOPLASTIE, DORURE ET ARGENTURE

Galvanoplastie. — La décomposition des sels par la pile a e importante application dans la *galvanoplastie*. On nomme art de modeler les métaux en les précipitant de leurs dis- ns salines par l'action lente d'un courant électrique. On a l admis que la galvanoplastie avait été découverte simul- nt, en 1838, par M. Jacobi, en Russie, et par M. Spencer, leterre; mais c'est à M. Jacobi qu'appartient la priorité. qu'on veut reproduire une médaille ou tout autre objet par noplastie, il faut d'abord s'en procurer une empreinte en sur laquelle puisse se déposer la couche métallique qui produire en relief la médaille. On a d'abord obtenu ces em- s à l'aide du soufre, de la stéarine, de l'alliage fusible de ; mais la substance généralement employée aujourd'hui est a-percha, dont l'emploi est facile et qui donne des empreintes grande pureté. On commence par recouvrir de plombagine dont on veut prendre l'empreinte, afin qu'il n'adhère pas à a-percha, ce qui se fait en le frictionnant avec une brosse qu'on a passée dans de la plombagine pulvérisée. Puis, chauffé dans l'eau chaude une certaine quantité de cette nce jusqu'à ramollissement, on applique dessus la pièce à uire, en ayant soin de la soumettre à une pression un peu Laissant ensuite refroidir, on détache la gutta-percha, qui adhérente, et l'on a alors sur cette substance une em- en creux, très-fidèle, de l'objet. Il reste à enduire cette inte de plombagine pour la rendre conductrice.

reproduire ensuite la pièce dont on a obtenu l'empreinte, nd une cuve remplie d'une dissolution saturée de sulfate re, et ayant posé dessus deux baguettes de laiton B et D 7), communiquant, l'une au pôle négatif et l'autre au pôle de la pile, on suspend à la première le moule *m*, qu'on a é, et à l'autre une plaque de cuivre rouge C. Le courant se nt ainsi fermé, le sulfate de cuivre est décomposé; son acide ygène de l'oxyde se rendent au pôle positif, tandis que le seul se rend au pôle négatif, et se dépose lentement sur le suspendu à la baguette B; on peut même ainsi suspendre ars moules à la fois. Au bout de 48 heures, le



La plaque de cuivre C, placée au pôle positif, n'a pa
pour but de fermer le courant, elle sert aussi à entre
solution dans un état de concentration constant; en
et l'oxygène qui se rendent au pôle positif se combi
cuivre de la plaque, et reproduisent constamment un
sulfate égale à celle qui a été décomposee par le cour

Pour la galvanoplastie, on préfère la pile de Dan
cause de la constance de son effet.

786. **Dorure galvanique.**— Avant de connaître la dé
des sels par la pile, on dorait au mercure. Pour cela
un amalgame d'or qu'on appliquait sur les pièces à do
tant ensuite les objets ainsi recouverts dans un four,
se volatilisait, et l'or seul restait sous la forme d'une
mince sur les objets dorés. Le même procédé était ap
genture; mais à ce procédé, coûteux et insalubre,
aujourd'hui la dorure et l'argenture galvaniques. La
la pile ne diffère de la galvanoplastie qu'en ce que la

recuit consiste à chauffer les pièces pour détruire les ma-
grasses dont elles ont pu être imprégnées dans les travaux
els elles ont été soumises antérieurement.

pièces à dorer étant ordinairement de cuivre, leur surface,
nt le recuit, s'est recouverte d'une couche de protoxyde et
xyde de cuivre que le dérochage a pour but d'enlever. Pour
on plonge les pièces encore chaudes dans un bain d'acide
ique très-étendu d'eau, où on les laisse assez longtemps
ue l'oxyde se détache. On les frotte alors avec une brosse
on les lave à l'eau distillée, et on les fait sécher dans de
ire de bois légèrement chauffée.

pièces étant encore irisées, il reste le décapage, qui con-
les plonger rapidement dans un bain d'acide azotique or-
e, puis dans un mélange du même acide, de sel marin et
e, et enfin à les laver dans l'eau pure.

pièces une fois préparées, on les suspend à l'électrode né-
d'une pile de 3 ou 4 couples de Daniell ou de Bunsen, et on
nge dans un bain d'or, en les disposant comme pour la gal-
astie (fig. 657). Elles restent dans le bain plus ou moins
mps, suivant l'épaisseur qu'on veut donner au dépôt.

beaucoup varié la composition des bains. Le plus simple
pose de 1 gramme de chlorure d'or et de 10 grammes de
e de potassium dissous dans 150 grammes d'eau. Pour en-
r le bain à un degré de concentration constant, on suspend
trode positive une lame d'or qui se dissout à mesure que le
isse déposer son or sur les pièces placées au pôle négatif.
rocédé qui vient d'être décrit s'applique très-bien pour do-
-seulement le cuivre, mais l'argent, le bronze, le laiton, le
hort. Quant aux autres métaux, comme le fer, l'acier, le zinc,
, le plomb, ils se dorent mal. Pour obtenir une bonne dorure,
bligé de les recouvrir d'abord d'une couche de cuivre, au
de la pile et d'un bain de sulfate de cuivre; c'est ensuite
re qui les recouvre qu'on dore comme il a été dit ci-dessus.

Argenture. — Tout ce qu'on vient de dire sur la dorure
que s'applique exactement à l'argenture; il n'y a de diffé-
ue dans la composition du bain, qui est formé de 1 gramme
ure d'argent et de 10 grammes de cyanure de potassium
dans 150 grammes d'eau. A l'électrode positive est sus-
une plaque d'argent qui empêche le bain de s'appauvrir, et
trode négative sont les pièces à argenter, bien décapées.

s les différents effets des courants qui viennent d'être dé-
l reste à faire connaître leur action sur les aimants.

CHAPITRE IV

EFFETS MAGNÉTIQUES DES COURANTS ; GALVANOMÈTE

788. **Expérience d'Œrsted, loi d'Ampère.** — A l'occa thermo-multiplicateur de Melloni, on a déjà vu l'action d que les courants fixes exercent sur les aimants mobiles (2 couvert, en 1819, par Œrsted, professeur de physique i hague, ce phénomène devint bientôt, entre les mains d et de Faraday, l d'une branche nou la physique, déc loin sous le nom d *magnétisme.*

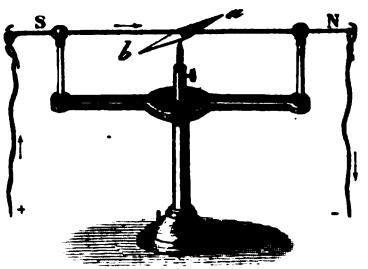


Fig. 658.

Pour répéter l'ex d'Œrsted, on te zontalement, dans tion du méridien que, un fil de cui dessus d'une aig mantée mobile (f Tant que le fil n'est point traversé par un courant, l'aig demeure parallèle; mais aussitôt que les extrémités du mises en communication avec les électrodes d'une pile, *l s'écarte et approche d'autant plus de prendre une a perpendiculaire au courant, que celui-ci est plus inten*

Quant au sens de la déviation, on a vu (297) qu'il dép direction du courant du nord au sud, ou du sud au nord sus ou au-dessous de l'aiguille. Or Ampère a compris c rents cas dans un seul énoncé en concevant un observat dans le fil qui réunit les deux pôles, de manière que, le entrant par les pieds et sortant par la tête, la face soit c ment tournée vers l'aiguille. Le courant ainsi personnifié, a donné la loi suivante, qui, dans tous les cas, se vérifie périence : *L'action directrice des courants sur les aima biles consiste toujours à faire dévier le pôle austral gauche du courant.*

On verra (829 et 840) que l'action directrice des cour les aimants est due à une action réciproque entre ces cou les courants d'Ampère qui circulent autour des aimants

789. **Galvanomètre, sa théorie.** — Le *galvanomètre*

ssi sous les noms de *multiplicateur* et de *rhéomètre*, est dû à hweigger, peu après la découverte d'Œrsted. Cet instrument, nt on a déjà donné une notion succincte à l'occasion du thermo-ultiplicateur (298), est une application de l'action directrice s courants sur les aimants : par la déviation qu'il imprime à iguille, il décèle la présence des courants; par le sens de la viation, il fait connaître leur direction; et par l'angle d'écart, sert à mesurer leur intensité.

L'action directrice de la terre tendant constamment à maintenir iguille aimantée dans le méridien magnétique (654), les cou-nts rencontrent là, pour faire dévier l'aiguille, une résistance

Fig. 659.

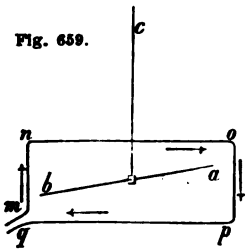
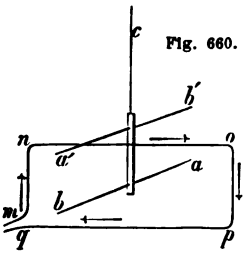


Fig. 660.



ui, lorsqu'ils sont très-faibles, peut rendre la déviation insen-ible. Il importe donc de multiplier l'action des courants et de iminuer la résistance de la terre. Ce double résultat s'obtient ir les deux procédés suivants :

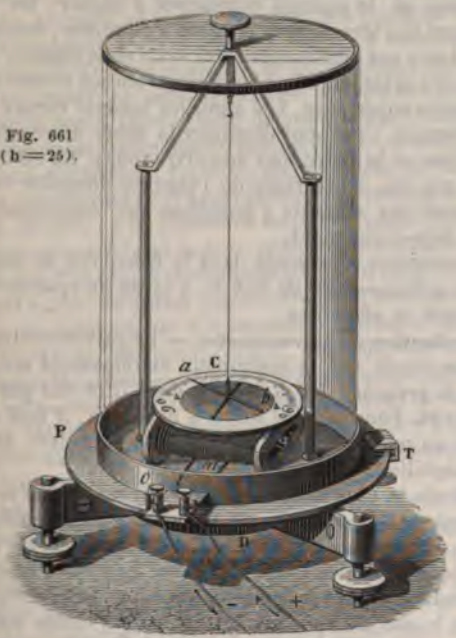
Le premier, dû à Schweigger, consiste à replier le fil que par-ourt le courant, au-dessus et au-dessous de l'aiguille dans le ens de sa longueur, de manière à former un circuit rectangu-ire vertical dans lequel elle est suspendue à un fil de cocon g. 659). Si on applique ici la loi d'Ampère (788), on reconnaît ilement que lorsqu'un courant parcourt le circuit *mnopq*, les atre parties *mn*, *no*, *op* et *pq* agissent dans le même sens ur faire dévier le pôle *a* en arrière du plan du dessin, et le pôle en avant. En enroulant le fil dans le sens de l'aiguille, on a ac *multiplié* l'action du courant. Si, au lieu d'un seul circuit, en fait plusieurs, l'action se multiplie encore et la déviation gmente. Toutefois on ne multiplierait pas indéfiniment l'action courant en continuant les circonvolutions ; car on verra bien-e l'intensité d'un courant s'affaiblit lorsque la longueur du l qu'il parcourt augmente. Le fil de cuivre ainsi tre recouvert de soie avec soin; sinon, l'électri circuit au suivant, le tout se comporterait comr ie. M. Tyndall a observé que la soie blanche c

sans l'autre. L'aiguille intérieure *ab* est alors influe
ci-dessus par le circuit *mnopq;* mais les différent
celui-ci n'agissent pas également sur l'aiguille *a'*
d'après la loi d'Ampère, la partie *no* tend à amener
avant, tandis que les trois portions *mn*, *op* et *pq* te
dévier le même pôle en arrière. A cause de la moind
c'est *no* qui prédomine, et par suite l'action finale du
plet est d'imprimer à *a'b'* une déviation dans le mên
ab, ce qui augmente l'action du courant; mais l'effet
astatique est surtout de réduire l'action directrice de
effet, si les deux aiguilles étaient rigoureusement de
de même longueur, et leurs axes magnétiques dans le
les actions contraires sur les pôles *a* et *b'*, ainsi que
b et *a'*, se neutraliseraient complétement, et l'actio
étant nulle, le système, rigoureusement astatique, r
rait d'autre résistance que la torsion du fil de suspen
pratique, la force de l'une des aiguilles l'emportant
celle de l'autre, la terre les dirige en vertu de leur différ
sité; mais cette différence pouvant être rendue aussi p
veut, on peut toujours arriver à une déviation appréc
pour des courants extrêmement faibles.

790. **Construction du galvanomètre.** — La figure 66
un galvanomètre extrêmement sensible construit par
Le pied de l'instrument se compose d'un disque épa
ton, porté par trois vis calantes; au-dessus est un p

; du cadre s'élèvent deux colonnes qui portent une vis de
ı laquelle est suspendu par un fil de cocon un système
e de deux aiguilles *ab* et *a'b'*. L'aiguille *ab* qui est au-
lu cercle sert à marquer les déviations; l'aiguille *a'b'* est

Fig. 661
(h = 25).



ıtérieur du circuit. C'est pour introduire cette aiguille
ente est pratiquée dans le cercle C; une ouverture sem-
ıon visible dans le dessin, existe entre les fils du cir-
dessous du cercle gradué. Au moyen des vis calantes, on
horizontalité de manière que le fil de cocon passe exacte-
le centre sans frotter contre les bords de la fente; et à
la vis de rappel on soulève ou on abaisse le système
jusqu'à ce qu'il tourne librement dans le circuit. Afin
rver l'instrument des agitations de l'air, on le recouvre
ge de verre.

se servir de l'instrument, on commence par l'orienter,
ire par diriger dans le méridien magnétique le diamè-
e par le zéro de la *graduation*. Pour cela, prenant

bute l'aiguille supérieure. Les aiguilles tendant enc
assez longtemps, c'est pour diminuer la durée de ce
que le cadran et le cadre sont de cuivre rouge. En e
plus tard que les oscillations de l'aiguille aimanté
dans ce métal des courants d'induction qui, réagiss
l'arrêtent très-rapidement.

Le galvanomètre représenté dans la figure 661 se
le nom de *galvanomètre de Nobili*, à cause du syst
qu'y a ajouté ce physicien.

791. Graduation du galvanomètre. — Le galvanom
vient d'être décrit, est un instrument extrêmement
constater la présence des courants; mais il ne fait
leur intensité. Pour le faire servir à cet usage, il fa
des tables au moyen desquelles on puisse déduire
tion de l'aiguille, l'intensité relative du courant.

La méthode la plus simple pour former ces table
multiplicateur à deux fils, due à M. Becquerel. On e
tanément, sur le cadre de l'appareil, deux fils de cuiv
de soie, identiques en longueur et en diamètre;
une source d'électricité dynamique constante, mais
fait passer le courant dans un des fils, ce qui donne
déviation, soit de 5 degrés. Puis, à l'aide d'une sou
identique avec la première, on fait passer en même
le second fil, un courant de même intensité que le
obtient alors une déviation de 40 degrés, due à l'ac

de distance en distance les déviations correspondantes à des intensités connues, puis on achève la table par la méthode des interpolations. Chaque galvanomètre exige une table particulière; car la relation entre l'intensité du courant et la déviation des aiguilles varie avec leur degré d'aimantation, leur longueur, leur distance du courant, et avec le nombre des tours du circuit.

Le multiplicateur à deux fils sert encore à mesurer la différence d'intensité de deux courants; ce qui s'obtient en faisant passer simultanément, en sens contraires, un courant dans chaque fil. L'appareil prend alors le nom de *galvanomètre différentiel.*

On gradue aussi facilement le galvanomètre, à l'aide des courants thermo-électriques. En effet, on verra bientôt (800) que l'intensité de ces courants est proportionnelle, jusqu'à la limite de 45 degrés environ, à la différence de température des soudures. Par conséquent, en faisant passer, dans le galvanomètre à un seul fil, le courant d'un couple thermo-électrique, il suffit, une des soudures étant à zéro, de porter successivement l'autre à 5, 10, 15,... 45 degrés, de noter au fur et à mesure la déviation de l'aiguille, et enfin d'achever, par interpolation, la graduation de 5 en 5.

792. **Usages du galvanomètre.**— Par son extrême sensibilité, cet appareil est un des instruments les plus précieux de la physique. C'est avec lui que M. Becquerel a constaté qu'il y a dégagement d'électricité dans toutes les combinaisons chimiques, et a déterminé les lois de ces combinaisons (747).

Par exemple, si l'on fixe aux extrémités du circuit du galvanomètre deux fils de platine, et si l'on plonge ceux-ci dans une capsule remplie d'acide azotique, on ne remarque aucune déviation de l'aiguille, ce qu'il était facile de prévoir, puisque le platine n'est pas attaqué par l'acide azotique. Mais si l'on verse une goutte d'acide chlorhydrique près d'un des fils immergés, aussitôt l'aiguille dévie, ce qui indique que le circuit est traversé par un courant. En effet, on sait que, par leur réaction mutuelle, les acides azotique et chlorhydrique donnent naissance à de l'acide chloro-azotique, ou *eau régale*, qui attaque le platine. On reconnaît de plus, par le sens de la déviation, que le platine est électrisé négativement et l'acide positivement.

Conditions auxquelles doit satisfaire le galvanomètre.— En yant sur les formules données plus loin sur l'intensité des ts (815), on reconnaît que les indications du galvanomètre oumises aux conditions suivantes :

si la résistance extérieure est assez petite, par rapport à u circuit galvanométrique, pour qu'on puisse la négliger, *ibilité de l'instrument est proportionnelle à la*

fil du galvanomètre, et indépendante du nombre des tours de ce fil. On doit donc faire usage, dans ce cas, d'un fil gros et court; c'est ce qui a lieu dans l'appareil de Melloni (296), et avec les courants thermo-électriques en général; la résistance des piles thermo-électriques étant toujours très-faible, le nombre des tours du fil varie alors de 30 à 300.

2° Au contraire, si c'est la résistance du circuit extérieur qui est très-grande, en sorte qu'on puisse négliger la résistance du fil du galvanomètre, *la sensibilité est proportionnelle au nombre des tours.* Il importe donc ici de faire usage d'un galvanomètre à fil long, mais fin pour qu'il puisse faire un grand nombre de tours sans trop s'écarter des aiguilles.

Par exemple, lorsque le galvanomètre est destiné à mesurer des courants dus aux actions chimiques, la résistance du circuit extérieur étant alors très-grande, le fil qui s'enroule sur le cadre doit être d'un petit diamètre, et faire de 600 à 800 tours au moins. Le nombre des tours s'élève même souvent à 2000 ou 3000, et pour des expériences très-délicates de physiologie il a été porté jusqu'à 30 000.

794. **Boussole galvanométrique.** — Pour les courants intenses, on fait usage de galvanomètres à une seule aiguille, et l'on ne fait faire au fil qu'un très-petit nombre de tours, même un seul. Le galvanomètre le plus simple est alors une boussole au-dessus de laquelle est tendu un fil de cuivre dirigé dans le sens du méridien magnétique, et dans lequel passe le courant dont on cherche l'intensité. L'instrument prend dans ce cas le nom de *boussole galvanométrique.*

CHAPITRE V

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES

795. **Expérience de Seebeck.** — On a déjà vu (296) que la chaleur peut donner naissance à des courants qu'on désigne sous le nom de *courants thermo-électriques,* pour les distinguer des courants dus aux actions chimiques, qui sont dits courants *hydro-électriques.* Les courants thermo-électriques, toujours très-faibles, sont remarquables par la liaison qu'ils établissent entre la chaleur et l'électricité, et par l'application qu'ils ont dans l'appareil de Melloni.

On savait déjà que plusieurs cristaux naturels, comme la tourmaline, la topaze, acquéraient des propriétés électriques lors-

[redacted]

...température, et Volta avait annoncé qu'une lame d'ar... ...ée inégalement à ses extrémités constituait un élémen... ...teur; mais c'est Seebeck qui, le premier, en 1821 ...e le mouvement de la chaleur dans un circuit métal ...e naissance à des courants électriques.

...ants se constatent au moyen d'une lame de cuivre *mn*

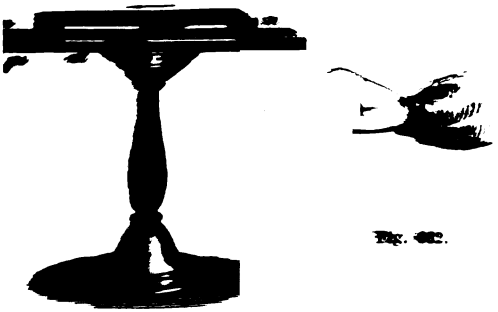


Fig. 662.

...trémités sont recourbées et soudées à une lame de bis... ...fig. 662). Dans l'intérieur du circuit ainsi formé est une ...mantée *a* mobile sur un pivot. Ayant placé l'appareil ...ection du méridien magnétique, on chauffe l'une des ... et l'on voit alors l'aiguille prendre une déviation qui ...production d'un courant de *n* vers *m*, c'est-à-dire de la ...ude à la soudure froide, dans le cuivre. Si, au lieu de ...soudure *n*, on la refroidit avec de la glace, en conser... ...tre soudure sa température, il se produit encore un ...ais en sens inverse, c'est-à-dire de *m* vers *n*, et, dans ...s, le courant a d'autant plus d'énergie, que la diffé... ...mpérature des deux soudures est plus grande.

...ne des courants thermo-électriques. — Les courants ...ctriques ne sont point dus au contact; car ils peuvent ...per dans des circuits formés d'un seul métal. Ils ne ...t pas non plus d'actions chimiques, puisque M. Becque... ...té qu'ils se produisent également dans le vide et dans ...e. Le même savant les avait attribués à une inégale ... de la chaleur dans les différentes parties du circuit. ...gnus a fait voir que, dans un circuit de deux conduc... ...driques de cuivre, d'inégal diamètre, mais dans les ...ditions physiques l'un et l'autre, si l'on chauffe un ...de contact, il ne se produit point de courant, quelle ... différence de diamètre et de masse entre ces c...

par un second fil de cuivre. Mais M. Becquerel lui
que si l'on détruit l'homogénéité de ce dernier
points, en le tordant plusieurs fois sur lui-même,
et qu'on chauffe alors près de ce point, l'aiguille
déviation, un courant allant du point chauffé au p
généité a été détruite. En chauffant de l'autre côt
point, le courant se produit en sens inverse.

797. **Pouvoirs thermo-électriques des métaux.** *pouvoir thermo-électrique* d'un métal accouplé à un circuit fermé, l'intensité relative du courant chauffant un des points de contact à une tempé tandis que l'autre est maintenue à zéro. Pour u rence de température entre les points de contact, avec les métaux, et ceux-ci restant les mêmes, il la différence de température.

Ayant soudé à la suite les uns des autres une différents, et mis les deux bouts en communicatio nomètre, M. Becquerel chauffa successivement cl dures à 20 degrés, toutes les autres étant mainte conductibilité restant sensiblement la même, le p électrique était mesuré par la déviation du galvan querel a pu ainsi ranger les métaux dans l'ordre pouvoirs thermo-électriques : bismuth, nickel, dium, manganèse, argent, étain, plomb, cuivre, antimoine, chacun étant positif avec ceux qui le

[redacted]

[redacted]

[redacted]

cuivre du premier se soude au bismuth du second, puis le deuxième cuivre de celui-ci au bismuth du troisième, et ainsi de suite, on a une *pile thermo-électrique*, qu'on fait fonctionner en maintenant les soudures de rang impair, par exemple, à zéro dans de la glace, et en chauffant celles de rang pair à 100 degrés dans des vases remplis d'eau à 100 degrés (fig. 664).

On a beaucoup varié la disposition des piles thermo-électriques; la plus en usage est celle adoptée par Nobili et appliquée par Melloni au thermo-multiplicateur (fig. 256, page 261).

800. **Lois des courants thermo-électriques.** — 1re Loi. *Dans un couple thermo-électrique, tant que la différence de température entre les deux soudures reste la même, le courant est rigoureusement constant.*

2e Loi. — *Dans une pile thermo-électrique, l'intensité du courant, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnelle au nombre des couples.*

3e Loi. — *L'intensité des couples thermo-électriques augmente avec la différence de température entre les soudures; et si l'une d'elles est à zéro, cette intensité est proportionnelle, jusqu'à 45 degrés, à la température de l'autre soudure.*

Ces lois sont dues à M. Becquerel. Dans la troisième, la limite de 45 degrés s'applique au couple cuivre et antimoine, mais elle varie avec les métaux. Pour le fer et le cuivre elle s'étend jusqu'à 300 degrés, et beaucoup au delà pour le fer et le palladium.

* 801. **Pile thermo-électrique d'Ed. Becquerel.** — M. Becquerel

Fig. 665.

père avait observé, dès 1827, qu'un fil de cuivre associé avec un fil de même métal sulfuré à la surface donnait, par une élévation de température d'un des contacts de 200 à 300 degrés, un couple thermo-électrique beaucoup plus énergique que ceux qu'on ob-

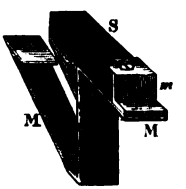
tient avec d'autres métaux. M. Ed. Becquerel pensa tout de suite à utiliser le sulfure de cuivre fondu dans la construction des piles thermo-électriques ; mais Bunsen fit connaître avant lui une pile thermo-électrique dans laquelle il faisait usage de sulfure de cuivre naturel (pyrite de cuivre). Peu après, Mathiessen et Marcus construisirent des piles thermo-électriques antimoine et zinc, plus puissantes en quantité que les piles au sulfure de cuivre, mais ayant moins de tension.

M. Ed. Becquerel, ayant donné suite à ses recherches sur le pouvoir thermo-électrique du sulfure de cuivre artificiel, a trouvé, en 1865, que cette substance chauffée à 200 ou 300 degrés est fortement positive, et qu'un couple de ce sulfure et de cuivre a une force électromotrice près de dix fois plus grande que celle du couple bismuth et cuivre de la figure 663. Le sulfure de cuivre naturel est, au contraire, fortement négatif.

Le sulfure artificiel ne fondant qu'à 1035 degrés environ, on peut en faire usage à des températures très-élevées. Le métal que M. Ed. Becquerel lui associe est le maillechort (alliage de 90 de cuivre et 10 de nickel). La figure 665 représente la disposition d'une pile de M. Ed. Becquerel de 64 couples rangés en deux séries de 32. La figure 667 donne, sur une plus grande échelle, la vue d'un seul couple, et la figure 666 celle de 6 couples en deux séries de 3. Le sulfure de cuivre est taillé en prismes rectangles S (fig. 667), de 10 centimètres de longueur sur 18 millimètres de largeur et 12 d'épaisseur. A l'extrémité antérieure est une armature de maillechort *m* destinée à préserver le sulfure du grillage

Fig. 666.

Fig. 667.



Quand on chauffe le couple à la flamme du gaz. En dessous est une [illegible]illechort MM qui se recourbe plusieurs fois pour aller [illegible]ir au sulfure du couple suivant, et ainsi de suite. Les [illegible] ainsi disposés en deux séries de 32 sont fixés à un cadre [illegible] supporté par deux colonnes de cuivre A, B (fig. 665), le

laquelle le gaz se dégage. En enflammant celui-ci
les couples, l'extrémité des lames de maillechort
la flamme à une température de 200 à 300 degrés.
le courant, on place sur la gauche du cadre deu
(fig. 666), communiquant l'une avec le premier s
pôle positif, l'autre avec le dernier maillechort, c'e
tif. A l'autre extrémité du cadre sont deux autres bo
suivant la manière dont les communications sont é
marcher la pile en tension, les 64 couples en une se
ou en quantité, c'est-à-dire en deux séries parallè

La résistance du sulfure de cuivre au passage de
par suite à la recombinaison des électricités contr
étant très-grande, le courant acquiert une forte
peut-il servir à télégraphier à une grande distanc
dessus suffit pour faire porter un poids de 100 kilo
fort électro-aimant. Elle fait rougir un fil de fer
décompose l'eau faiblement. M. Becquerel a recon
à 9 couples de cette pile pour fournir une force
équivalente à celle d'un couple à sulfate de cuivr

802. **Applications des courants thermo-électriques.** — L
application des courants thermo-électriques est celle qui a été
au thermo-multiplicateur, appareil déjà décrit (299), et dont
breux usages dans l'étude de la chaleur rayonnante.

Par leur constance et leur proportionnalité aux différences
les courants thermo-électriques fournissent une méthode sim
pour graduer les galvanomètres (791). Ils ont encore trouv

-même dans de l'éther *e*, dans une éprouvette plus grande C. A côté momètre *t*, très-sensible, qui donne la température de l'éther. Enfin, S, par un tuyau de caoutchouc et un tube de verre, sert à faire pas-her un courant d'air qui le vaporise et le refroidit. Si, au contraire, chauffer, on approche de l'éprouvette C un vase hémicylindrique de ntenant de l'eau chaude, ou simplement un linge chaud.

s connus, tant que les deux soudures sont à la même température,

Fig. 668.

ant ne se produit dans le circuit, et le galvanomètre reste à zéro; que la plus faible différence de température existe, l'aiguille du re dévie et marque, par le sens de sa déviation, si c'est la sou-est la plus chaude, ou celle plongée dans le mercure. Si c'est cette fait marcher le soufflet jusqu'à ce que l'éther se vaporisant et se t, le galvanomètre revienne à zéro. Les deux soudures étant alors à npérature, si on consulte le thermomètre *t*, il fait connaître la tem-a lieu en B.

le cet instrument, M. Becquerel a fait de nombreuses recherches sur ure du sol à différentes profondeurs, sur celle de l'air à diverses t enfin sur la température des plantes et des animaux.

rromètre électrique d'Ed. Becquerel. — Dès 1835, M. Becquerel voir que les courants thermo-électriques peuvent être utilisés pour très-hautes températures; et Pouillet, en 1836, adoptait un ther-ctrique fer-platine; mais de 500 à 700 degrés, les indications du cou-ne sont tout à fait en retard sur la marche de la température; de étant très-oxydable, ce couple s'altère.

cquerel, ayant constaté qu'un couple platine-palladium est celui

les indications offrent le plus de régularité, a adopté ces deux métaux pour la construction du pyromètre électrique. Son appareil est formé de deux fils, l'un de platine, l'autre de palladium, tous les deux de 2 mètres de longueur et de 1 millimètre carré de section. A leur extrémité ils ne sont point soudés, mais seulement serrés fortement, sur un centimètre de longueur, par un fil fin de platine. Le fil de palladium est renfermé dans un tube mince de porcelaine; celui

Fig. 669.

de platine est à l'extérieur, et le tout est placé dans un tube P aussi de porcelaine et plus gros (fig. 669). C'est l'extrémité de ce dernier contenant la ligature qu'on plonge dans le lieu dont on cherche la température. De l'autre extrémité sortent les fils platine et palladium *m* et *n*, qui vont se souder à deux fils de cuivre qui conduisent le courant à un magnétomètre G. Dans le parcours de ces fils, leurs soudures avec les fils *m* et *n* sont engagées dans deux tubes de verre plongés dans de la glace, afin que ces soudures, étant toutes deux à la même température, ne donnent lieu à aucun courant.

Le magnétomètre est un galvanomètre à grandes dimensions, très-sensible. Il se compose d'un barreau aimanté *ab* placé dans un cadre de cuivre rouge, qui *amortit* les oscillations (879), et porté par un étrier H, suspendu lui-même à

l de platine très-fin. Sur l'étrier est fixé un miroir M tournant avec
ı, et destiné à donner par réflexion l'image des divisions tracées sur
e horizontale E, placée à distance. Ces divisions s'observent avec une
Pour cela, avant le passage du courant, on amène l'image du zéro
le, qui est mobile, au fil micrométrique de la lunette; alors la plus
iation du miroir donne l'image d'une division plus élevée, et, par
igle d'écart du barreau, angle qui est toujours très-petit et ne doit pas
ou 4 degrés; ce qu'on obtient en plaçant dans le circuit un rhéostat
ngle d'écart connu, on en déduit l'intensité du courant et la tempé-
couple platine-palladium, au moyen de tables pyrométriques. Celles-ci
isent par interpolation quand on connaît les intensités correspondantes
mpératures voisines de celles qu'on veut observer.
ications du pyromètre électrique vont jusqu'à 1 200 degrés, point de
palladium.

CHAPITRE VI

NSITÉ, RÉSISTANCE, VITESSE ET DÉRIVATION DES COURANTS

ensité des courants. — L'*intensité* d'un courant est représentée par
ce soit décomposante, éclairante ou calorifique, soit induisante sur un
ant ou sur une aiguille aimantée, et deux courants sont dits de même
nand ils produisent le même effet, par exemple quand ils décompo-
le même temps une même quantité d'eau, ou impriment à l'aiguille
a même déviation. De même, un courant est double, triple d'un autre,
roduit un effet double, triple. On ne peut déterminer l'intensité absolue
its, mais seulement relative.
jà vu que cette intensité se détermine par le voltamètre et par le gal-
(777 et 790), le premier étant utilisé pour les courants intenses, le
ır les courants faibles. Les indications de ces deux instruments sont
nelles entre elles; mais, tandis que le galvanomètre marque à chaque
ntensité du courant, le voltamètre ne donne que l'intensité moyenne
ı temps donné. L'intensité des courants puissants se mesure encore avec
des sinus et la *boussole des tangentes*, dues toutes les deux à Pouillet.
irons en outre le *rhéostat*, instrument qui sert à modifier l'intensité
its en faisant varier la résistance des circuits qu'ils parcourent.
assole des sinus. — Cet instrument diffère du galvanomètre déjà dé-
que le fil de cuivre dans lequel passe le courant ne fait autour de l'ai-
antée qu'un très-petit nombre de tours, même quelquefois un seul. Au
n cercle horizontal N (fig. 670) est une aiguille aimantée *m*; une
aiguille *n*, de cuivre argenté, et mobile avec la première, à laquelle
ée, sert à repérer l'aiguille *m* sur le cercle gradué N. Un cercle de
st disposé perpendiculairement au cercle horizontal. C'est sur ce cercle
iroule le fil dans lequel passe le courant. Les bouts de ce fil, repré-
, viennent se terminer à deux pièces E, auxquelles aboutissent deux
re *a* et *b*, en communication avec la source électrique dont on veut
courant. Enfin, les cercles N et M sont portés sur un pied O, qui
er autour d'un axe vertical passant par le centre d'un cercle hori-
H.
it galvanométrique M étant orienté, c'est-à-dire dirigé dans le méri-
étique, et par conséquent dans le même plan que l'aiguille

passer le courant dans les fils *a* et *b*. Les aiguilles ayant dévié, on t circuit M dans le sens de la déviation jusqu'à ce qu'il coïncide de nouv le plan vertical passant par l'aiguille aimantée *m*. A ce moment, l'acti

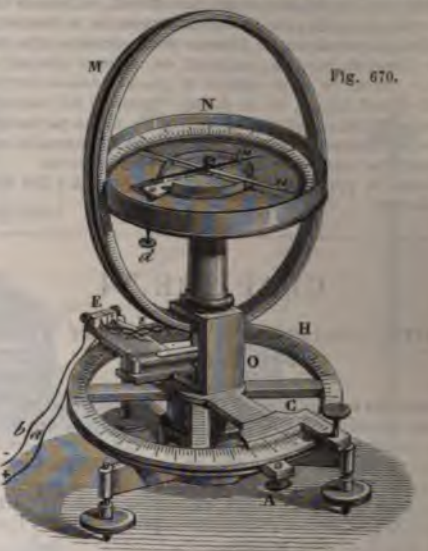


Fig. 670.

trice du courant s'exerçant perpendiculairement à la direction de l'aig mantée, le calcul fait voir que l'intensité du courant est proportionnelle de l'angle de déviation de cette aiguille, angle qui est égal à la rotation cle M et se mesure sur le cercle H, au moy vernier que porte la pièce C. C'est cette pi fixée au pied O, sert à le faire tourner au d'un bouton A auquel elle est liée. L'angl viation connu, et par suite son sinus, on en l'intensité du courant, puisque cette inten proportionnelle au sinus.

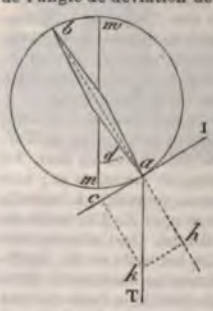


Fig. 671.

Pour démontrer que l'intensité du cour proportionnelle au sinus de l'angle de dé soient mm' (fig. 671) la direction du méridi gnétique, d l'angle de déviation, I l'intens courant, et T la force directrice de la terre. représente par ak la direction et l'intensité d dernière force, on peut la remplacer par les composantes ah et ac (30). Or la première n aucune action directrice sur l'aiguille ab, composante ac qui fait seule équilibre à la for faut donc qu'on ait $I = ac$. Mais le triangle rectangle ack donne $ac = ak$ ou $ac = T \sin d$, l'angle cak étant le complément de l'angle d, et ak donc enfin $I = T \sin d$, ce qu'il fallait démontrer.

oussole des tangentes, l'aiguille *ab* est très-petite, et l'intensité du alors très-sensiblement proportionnelle à la tangente de l'angle de l'aiguille aimantée.

ostat. — Le *rhéostat*, dû à M. Wheatstone, est un appareil qui sert intensité des courants, en donnant le moyen d'augmenter à volonté la leur propagation (808). Par suite, introduit dans un circuit voltaïque mps qu'un galvanomètre, il donne le moyen de produire sur celui-ci on déterminée. Il se compose d'un cylindre de laiton A et, à côté, bois B dont le pas est de 1 millimètre (fig. 672). Un fil fin de lai- n bout à l'extrémité du cylindre A, s'enroule plus ou moins sur celui- se sur la vis de bois, autour de laquelle il s'enroule jusqu'en B. Là,

Fig. 672.

fil est mis en communication avec un axe métallique qui porte la avec une lame de cuivre qui aboutit à la borne *m*. Sur les axes et de la vis sont montées deux roues d'engrenage d'égal diamètre, un pignon. En faisant tourner le cylindre A dans un sens ou dans aide d'une manivelle M, la vis B tourne dans le même sens avec une , et le fil se déroule du cylindre sur la vis ou réciproquement. Le tours du fil sur le cylindre croissant ou décroissant à chaque révolu- helle horizontale, placée au-dessus et divisée en millimètres, marque de tours, tandis qu'une aiguille fixée à l'axe de la vis donne, sur un é, les fractions de tours; d'où l'on déduit la longueur de fil enroulée nfin, une pièce mobile O sert à établir ou à interrompre la commu- re les bornes *m* et *n*.

s connus, le courant, entrant dans l'appareil par la borne *a*, gagne A, dans lequel il se propage sans résistance jusqu'au point où le fil vis de bois. Suivant alors le fil dans les spires de cette vis jusqu'en s ce parcours que le courant rencontre une résistance d'autant plus le fil est plus fin et qu'il fait un nombre de tours plus considérable res de la vis. De celle-ci le courant arrive à la borne *m*, et de là, ièce O est en contact avec le pied de la borne *n*, il revient par la pile de laquelle il est parti.

s maintenant qu'à la sortie du rhéostat le courant passe dans un re et y produise une déviation de 60 degrés. Si l'on ouvre la pièce O, substitue un conducteur K dont on veut déterminer la résistance te, la conductibilité, le circuit étant alors modifié, le galvanomètre déviation, soit de 50 degrés. Mais en enroulant le fil lentement sur le la résistance diminue sur la vis, et bientôt le galvanomètre marque 60. Si la longueur du fil sur la vis a été diminuée de 2 mètres, on que 2 mètres du fil fin de l'appareil offrent la même résistance que le K introduit dans le circuit. Il en serait de même si l'on inte-

S'il s'agit, par exemple, de comparer la résistance du fer à c
on fait passer un courant constant dans la colonne mercurielle
même temps, dans une boussole des sinus. Ayant noté la déviat
celle-ci, on remplace la colonne mercurielle par un fil de fer
carré de section, en augmentant successivement sa longueur
boussole revienne à la même déviation. Or on trouve qu'il faut
ner au fil de fer une longueur de 7 mètres, d'où l'on conclut qu
la résistance du mercure est 7 fois plus grande que celle du f

En expérimentant sur des fils métalliques dont la nature,
section varient, et en expérimentant sur les couples eux-même
la résistance aux courants est soumise aux lois suivantes :

1° Toutes choses égales d'ailleurs, *elle est proportionnelle d*
conducteurs.

2° *Elle est en raison inverse de leur section.*

3° *Elle est en raison inverse de la conductibilité électrique d*
stances qui composent le circuit (809).

4° *Dans l'intérieur de la pile, elle est en raison inverse de la*
ples, c'est-à-dire de la section du prisme liquide qui unit un c

Il découle des deux premières lois que la résistance ne chan
section des conducteurs varie dans le même rapport que leur

Quant à la résistance des liquides, elle est considérable. En
expériences de Pouillet, la résistance des dissolutions salines e
fois plus grande que celle du cuivre rouge, et celle de l'eau d
plus grande que celle de l'acide azotique.

809. **Coefficients de conductibilité pour les courants.** —
a trouvé que les *pouvoirs conducteurs* ou *coefficients de cond*
des métaux pour l'électricité, sont représentés, à zéro, par les n
celui de l'argent étant pris égal à 100 :

Argent recuit	. . . . .	100	Palladium écroui.	. .
Cuivre id.	. . . . .	91	Fer id.	. . .
Or id.	. . . . .	65	Plomb laminé.	. . . .
Zinc id.		24	Platine écroui	

ame une conductibilité purement *électrolytique*, c'est-à-dire due à ion chimique. Cependant Faraday, en faisant connaître sa loi gé- ompositions électrolytiques (779), avait annoncé qu'elle compor- s restrictions dans le cas où les liquides seraient capables de con- ité sans subir de décomposition.

ibilité purement électrolytique a surtout été soutenue par Buff; Foucault, les liquides possèdent aussi une conductibilité propre, *ité physique*, à la manière des métaux; seulement cette dernière plus faible que la conductibilité électrolytique.

Ohm sur l'intensité des courants thermo-électriques. — Dans a résistance intérieure est assez faible pour être négligée, comme o-électriques, dont toutes les parties sont métalliques, l'intensité résente les lois suivantes :

oses égales d'ailleurs, *elle est en raison inverse de la longueur du sr que parcourt le courant*, c'est-à-dire *en raison inverse de la*

irectement proportionnelle à la section du même circuit.

irectement proportionnelle au coefficient de conductibilité du circuit.

t connues sous le nom de *lois de Ohm*, parce que c'est ce physi- 827, les trouva théoriquement, en s'appuyant sur les travaux de a propagation de la chaleur.

ation expérimentale des lois de Ohm. — Pouillet, en 1838, s de Ohm uniquement par l'expérience. Pour cela, il choisit deux -électriques pareils à celui représenté dans la figure 863, identiques dont l'une des soudures étant à zéro, l'autre était à 100 degrés. ant dans chaque couple les pôles par deux fils de cuivre rouge m, mais de longueurs inégales l et l', et en enroulant ces fils en s sur le cadre d'un même galvanomètre, Pouillet trouva que les se faisaient équilibre quand les nombres de tours étaient en raison igueurs l et l'; c'est-à-dire que le fil l' étant, par exemple, trois que l, il devait faire trois fois plus de tours; ce qui montre que courant correspondant à l' est trois fois moindre que celle du cou- urt le fil l, et vérifie la première loi de Ohm.

ter la seconde, Pouillet réunissait les pôles des mêmes couples par vre de même longueur, mais de sections différentes; et enroulant ci-dessus, sur un même galvanomètre, les deux courants se fai- e lorsque les nombres de tours étaient en raison inverse des sec- où l'on conclut que la section étant deux, trois fois plus grande, lent elle-même deux, trois fois plus grande.

la troisième loi, les fils étaient de même longueur et de même 'un de cuivre, et l'autre de platine, de plomb, de fer, etc.; l'é- issait alors quand les nombres de tours étaient en raison inverse de conductibilité c et c' (809); donc les intensités varient en rai- s mêmes coefficients.

onstaté que, dans les liquides, comme dans les solides, l'intensité ; en raison directe de la section de la colonne liquide que traverse en raison inverse de sa longueur, pourvu que celle-ci égale au aix fois le diamètre de la section.

sion algébrique des lois de Ohm, longueur réduite. — En re- I l'intensité d'un courant thermo-électrique, par l, s, c, la lon- ion et le coefficient de conductibilité du circuit parcouru par le r A une quantité variable avec la nature du couple, mais con- même couple et pour une même différence de température des

ois lois de Ohm sont comprises dans la formule $I =$

deux circuits sont équivalents au premier, ce qui n'a lieu qu'autant que

$$\frac{cs}{l} = \frac{c's'}{l'}, \quad \text{d'où} \quad l' = c's'\frac{l}{cs}.$$

Prenant $s' = 1$, et $c' = 1$, on a $l' = \frac{l}{cs}$.

Pouillet a donné le nom de *longueur réduite* à cette valeur $\frac{l}{cs}$ d
circuit par rapport au premier. Cette longueur réduite représentant la r
R d'un fil de cuivre rouge d'une longueur l', dont la section est de l
tre carré, et le coefficient de conductibilité égal à 1, on pose $\frac{l}{cs} = R$,
mule $I = A\frac{cs}{l}$, qui représente les lois de Ohm, prend la forme $I =$

813. **Mesure de la force électromotrice d'un couple.** — La forme
pouvant se mettre sous la forme $IR = A$, on sait, d'après la premiè
Ohm (810), que, pour un couple donné, le produit IR est constant;
donc de même de la quantité A. De là on a choisi cette quantité po
senter la force électromotrice du couple.

L'égalité $I = \frac{A}{R}$ fait voir que *l'intensité du courant est proportionn*
force électromotrice.

Si l'on prend $R = 1$, on a $A = I$; c'est-à-dire que *la force électromot*
couple est égale à l'intensité du courant quand la résistance est égale à l'

On a adopté plusieurs méthodes pour calculer la force électromotrice A
sont fondées sur la formule $I = \frac{A}{R}$; c'est-à-dire qu'on détermine A a
de I et de R, I étant mesuré par le poids d'hydrogène que le courant
par minute dans le voltamètre (777), et R l'étant à l'aide du rhéostat (

le liquide, et le coefficient de conductibilité de ce dernier. En représentant cette résistance par r et l'ajoutant à R, la formule $I=\frac{A}{R}$ devient $I=\frac{A}{R+r}$, et sous cette forme elle satisfait à la première loi de Ohm.

815. Formules générales sur l'intensité des courants. — On vient de voir que les formules qui représentent l'intensité des couples thermo-électriques et celle des couples hydro-électriques, sont respectivement $I=\frac{A}{R}$ [1], et $I=\frac{A}{R+r}$ [2], r étant la longueur réduite qui représente la résistance intérieure du couple. De ces formules on déduit facilement l'intensité des courants pour un nombre quelconque de couples.

En effet, soient n couples thermo-électriques associés en série, c'est-à-dire à la suite les uns des autres, et soient A, A', A''..., les forces électromotrices de chacun d'eux. Ces forces s'ajoutant, la force électromotrice finale est A+A'+A''..., et la formule [1] devient $I=\frac{A+A'+A''...}{R}$ [3].

Si les n couples sont hydro-électriques, il y a à tenir compte des résistances propres à chacun d'eux. En représentant celles-ci par r, r', r''..., la résistance totale des couples est $r+r'+r''$..., et la formule [3] prend la forme

$$I=\frac{A+A'+A''...}{R+r+r'+r''...} \quad [4].$$

Les différents couples d'une pile étant toujours sensiblement identiques, on peut supposer $A=A'=A''$..., et $r=r'=r''$...; les formules [3] et [4] deviennent alors

$$I=\frac{nA}{R} \quad [5], \quad \text{et} \quad I=\frac{nA}{R+nr} \quad [6].$$

La formule [5] montre que, dans les piles thermo-électriques, l'intensité est proportionnelle au nombre des couples.

Quant aux piles hydro-électriques, la formule [6] pouvant se mettre sous la forme $I=\frac{A}{\frac{R}{n}+r}$, si la résistance R est petite par rapport à r, on peut négliger le terme $\frac{R}{n}$ à côté de r, et I égale sensiblement alors $\frac{A}{r}$, c'est-à-dire l'intensité d'un seul couple; d'où $\frac{A}{r}$ est une valeur maximum. Il faut donc, lorsque R est faible, n'employer qu'un seul couple, mais à grande surface, pour diminuer la résistance r.

Au contraire, si la résistance R est assez grande pour qu'on puisse négliger r par rapport à $\frac{R}{n}$, on a $I=\frac{A}{\frac{R}{n}}$, ou $I=\frac{nA}{R}$, valeur croissant avec n; c'est-à-dire qu'il faut alors faire usage d'un grand nombre de couples.

816. Combinaisons diverses des couples d'une pile selon la résistance. — donné un certain nombre de couples égaux entre eux, il importe, d'après précède, de les combiner de manières différentes, suivant la résistance suit interpolaire. Par exemple, dans le cas de six couples seulement, on mer les quatre combinaisons suivantes : 1° une seule série longitudinale 1), dont C représente l'électrode positive et Z l'électrode négative; 2° deux arallèles de trois couples chacune (fig. 674), les électrodes positives des ries se réunissant en C, et leurs électrodes négatives en Z; 3° t les de deux couples chacune (fig. 675), dont les électrodes de ccore concourir en une seule; 4° enfin, six séries d'un seul cou

(fig. 676), dont tous les pôles se réunissent en C et en Z. Avec douze couples, on pourrait réaliser huit combinaisons différentes, et ainsi de suite à mesure qu'on prend un plus grand nombre de couples. Les combinaisons en séries longitudinales se désignent sous le nom d'*association en série;* et celles en séries parallèles, sous celui d'*association en batterie*.

Fig. 673.

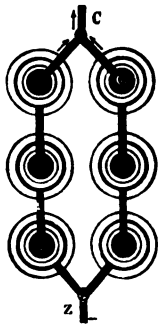


Fig. 674.

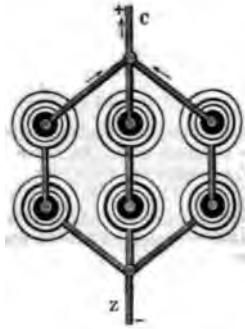


Fig. 675.

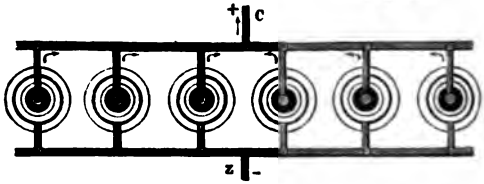


Fig. 676.

Dans ces diverses combinaisons, diminuer la longueur des séries pour en augmenter le nombre dans un rapport inverse, revient à diminuer le nombre des couples et à augmenter la surface, ce qui rend la résistance de la pile moindre, et conduit, pour un même nombre de couples, à des effets très-différents.

Pour n couples hydro-électriques, montés en série, on a vu ci-dessus (815) que l'intensité I est donnée par la formule $I = \frac{nA}{R + nr}$ [6]. Pour calculer l'intensité I′ du courant fourni par les mêmes couples, lorsqu'ils sont montés en batterie (fig. 676), observons qu'alors la pile ne contenant en réalité qu'un seul couple d'une surface n fois plus grande, la résistance est n fois moindre, c'est-à

On a donc $$I = \frac{nA}{R + nr}, \quad \text{et} \quad I' = \frac{A}{R + \frac{r}{n}} = \frac{nA}{Rn + r},$$

I étant l'intensité en série, et I′ l'intensité en batterie.

ieux formules, pouvant s'écrire sous la forme

$$I=\frac{nA}{(R+r)+(n-1)r}, \quad \text{et} \quad I'=\frac{nA}{(R+r)+(n-1)R},$$

-seulement même numérateur, mais leurs dénominateurs ont une partie ie $R+r$, et leurs secondes parties ne diffèrent que par les facteurs R ir suite, si $R=r$, on a $I=I'$; si $R>r$, on a $I'<I$, et pour $R<r$, on $I'>I$.

donc avantage à monter la pile en batterie lorsque R est faible, et en ns le cas contraire, résultat conforme à ce qu'on a vu plus haut (815).

. **L'effet maximum a lieu lorsque la résistance extérieure égale la nce intérieure de la pile.** — Soient N couples associés en k séries paral- n couples chacune. Chaque série a une force électromotrice nA, et une ce nr; pour k séries montées en batterie, la résistance étant k fois moin-

a $$I=\frac{nA}{R+\frac{nr}{k}}, \quad \text{ou} \quad I=\frac{knA}{kR+nr}.$$

ait que plus le dénominateur d'une fraction est petit, plus la fraction ide. La valeur de I sera donc maximum quand le dénominateur $kR+nr$ nimum.

posé, si l'on représente par m ce minimum, on a $kR+nr=m$ [A], a dans laquelle k et n sont deux variables dont le produit est constant et nombre total des couples; c'est-à-dire que $kn=N$, d'où $k=\frac{N}{n}$. Portant leur de k dans l'équation [A], on a une équation du second degré par à n. En la résolvant, il vient

$$n=\frac{m}{2r}+\frac{1}{2r}\sqrt{m^2-4NRr} \text{ [B].}$$

ne peut prendre $m^2<4NRr$, sinon on aurait une quantité négative sous al, et la valeur de n serait imaginaire. La plus petite valeur qu'on puisse à m^2 est donc $4NRr$; d'où $m=2\sqrt{NRr}$. Portant cette valeur de m dans [B], on trouve $n=\frac{1}{r}\sqrt{NRr}$, ou $nr=\sqrt{NRr}$ [1].

étant égal à $\frac{N}{n}$, on a $k=\frac{Nr}{\sqrt{NRr}}$; d'où $kR=\frac{NRr}{\sqrt{NRr}}=\sqrt{NRr}$ [2].

ormules [1] et [2] font voir que le dénominateur $kR+nr$ est minimum, uite I maximum, quand $kR=nr$; c'est-à-dire quand $R=\frac{nr}{k}$. Donc, e l'effet d'une pile soit maximum, *il faut associer les couples de manière résistance extérieure* R *et la résistance intérieure* $\frac{nr}{k}$ *soient égales.*

Vitesse de l'électricité. — De nombreuses tentatives ont été faites pour ser la vitesse de propagation de l'électricité dans les fils métalliques. En Wheatstone fit usage d'un miroir tournant semblable à celui déjà dé- nariant de la vitesse de la lumière (fig. 370, page 439). D'après le re- uvait, dans un temps donné, l'image de l'étincelle produite par une . — Leyde, lorsque l'électricité passait dans un long fil, M. Wheatstone que l'électricité, dans un fil de laiton de 2 millimètres de diamètre, se ait avec une vitesse de 460 000 kilomètres par seconde, vitesse qui cor- à une fois et demie celle de la lumière. M. Walker, en Amé 1840, des recherches sur le même sujet au moyen de sign

par les fils de télégraphes électriques, trouva que la vitesse de l'électricité était de 30 000 kilomètres par seconde, nombre 15 fois plus petit que le précédent.

En 1850, MM. Fizeau et Gounelle, en expérimentant sur les fils télégraphiques de Paris à Amiens et à Rouen, sont arrivés aux résultats suivants :

1° Dans un fil de fer dont le diamètre est de 4 millimètres et demi, l'électricité se propage avec une vitesse de 101 700 kilomètres par seconde.

2° Dans un fil de cuivre d'un diamètre de 2 millimètres et demi, la vitesse est de 177 700 kilomètres.

3° Les deux électricités se propagent avec la même vitesse.

4° Le nombre et la nature des éléments dont la pile est formée, et, par conséquent, la tension de l'électricité et l'intensité du courant, n'ont pas d'influence sur la vitesse de propagation.

MM. Burnouf et Guillemin, en 1854, en expérimentant sur un circuit de 164 kilomètres, entre Foix et Toulouse, ont trouvé, dans des fils de cuivre, la vitesse de 180 000 kilomètres.

Dans des expériences faites entre les observatoires de Greenwich et d'Édimbourg, avec des fils de cuivre, on a trouvé 12 200 kilomètres pour la vitesse de l'électricité; et, entre les observatoires de Greenwich et de Bruxelles, à l'aide d'un fil sous-marin, on a trouvé seulement 4 300 kilomètres; mais, dans ce dernier cas, le fil de cuivre, recouvert de gutta-percha, étant en grande partie plongé dans la mer, Faraday a fait voir que cette énorme différence est due à l'action par influence que le fil exerce au travers de la gutta-percha sur le liquide dans lequel il est plongé. Ce sont donc les nombres de MM. Fizeau et Gounelle, et de MM. Burnouf et Guillemin, qui représentent avec le plus de fidélité la vitesse de l'électricité dans les fils métalliques.

819. **État permanent et état variable dans les circuits voltaïques.** — Un courant est à l'*état permanent* quand, dans toutes les parties du circuit, il passe des quantités égales d'électricité. Or, à la fermeture du courant, l'état permanent ne s'établit pas instantanément; il passe d'abord plus d'électricité dans les parties les plus rapprochées de la pile : c'est l'*état variable*. C'est Ohm qui, le premier, a signalé l'état variable dans la propagation des courants. M. Gaugain en a recherché les lois dans les corps peu conducteurs, tels que des fils de coton et des colonnes d'huile, et MM. Burnouf et Guillemin dans les fils métalliques des lignes télégraphiques.

Ces deux physiciens sont ainsi arrivés aux résultats suivants avec un circuit de 570 kilomètres, communiquant d'un bout avec une pile à charbon de 60 éléments, et de l'autre avec la terre. 1° Pendant l'état variable, l'intensité du courant est plus faible près de la pile que dans le reste du circuit. 2° Une fois l'état permanent obtenu, le courant est, au contraire, moins intense à l'extrémité qui communique avec le sol, ce qui s'explique par les dérivations (830) qui se produisent par les poteaux et par l'air humide. 3° La durée de l'état variable a été de $\frac{1}{50}$ de seconde avec un circuit de 570 kilomètres. 4° La durée de l'état variable est d'autant moindre, que le courant est plus intense. 5° Enfin, à l'ouverture du courant, la durée de la décharge, c'est-à-dire du retour du circuit à l'état neutre, égale à peu près quatre fois celle de l'état variable.

L'existence de l'état variable explique la discordance qu'on rencontre dans les résultats obtenus par les expérimentateurs qui ont cherché la vitesse de propagation de l'électricité; elle fait voir en même temps que cette vitesse ne peut être déterminée qu'approximativement.

820. **Courants dérivés, lois de la dérivation.** — Soit le courant d'une pile d'un élément de Bunsen par exemple, parcourant un fil de cuivre représenté (677); et considérons le cas où l'on réunit deux points quelconques n et q du circuit par un second fil qxn. Le courant de la pile, se bifurquant alors au point q, se partage en deux autres, l'un qui continue à se propager dans le sens qn, et l'autre qui prend la direction $qxnm$.

s deux points q et n, d'où part et où aboutit le second conducteur, ont le nom de *points de dérivation;* l'intervalle qpn qui les sépare, celui de nes de *dérivation*, et le fil qxn, celui de *fil de dérivation.* Le courant qui urt le fil qxn se nomme le *courant dérivé;* le courant qui parcourait le fil $rqpnm$ avant la dérivation, est le *courant primitif;* celui qui traverse

Fig. 677.

ème conducteur après la dérivation, est le *courant partiel;* et enfin on ap- *courant principal* la totalité du courant qui parcourt tout l'ensemble du it quand on a ajouté le fil de dérivation.

s courants dérivés sont soumis aux deux lois suivantes :

L'intensité du courant dérivé est directement proportionnelle à l'intensité du ant primitif et à la distance de dérivation.

Quel que soit le nombre des points de dérivation, la somme des intensités courants dérivés égale l'intensité du courant primitif.

CHAPITRE VII

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

1. **Actions mutuelles des courants électriques.**— Lorsque deux métalliques voisins sont traversés simultanément par un cou- électrique, il se produit entre eux, selon la direction rela- des deux courants, des attractions ou des répulsions ana- es à celles qui s'exercent entre les pôles des aimants. Ces nomènes, dont la découverte est due à Ampère, peu de temps s celle d'Œrsted (788), constituent une branche de l'élec- té dynamique qu'on nomme *électro-dynamique.* Les lois qui régissent présentent différents cas, suivant que les courants parallèles ou angulaires, rectilignes ou sinueux.

2. **Lois des courants parallèles.** — 1° *Deux courants paral- de même sens s'attirent.*

x courants parallèles de sens contraires se repoussent.

à l'intensité de l'action dynamique entre les courants s, elle présente les deux lois suivantes :

re deux *éléments* de courants, c'est-à-dire entre deux ons infiniment petites, *l'attraction et la répulsion* sont

raison composée des intensités des courants, et en raison inverse du carré de la distance.

2° Entre un courant indéfini et un courant fini, *la résultante des attractions ou des répulsions totales est proportionnelle à la longueur du courant fini, et en raison inverse de la simple distance au courant indéfini.*

Les deux dernières lois ont été trouvées par le calcul par Ampère. Les deux premières se démontrent expérimentalement à

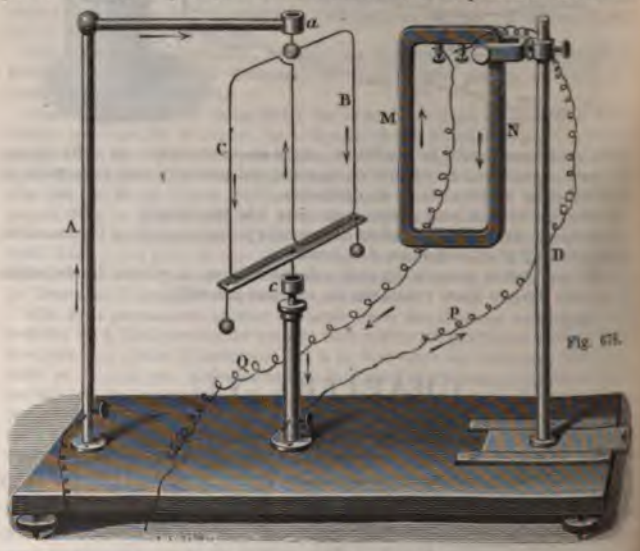


Fig. 678.

l'aide d'un appareil dû à Ampère, modifié ensuite par Pouillet, et enfin par Obellianne. Nous le donnons ici tel qu'il est construit par Ruhmkorff.

L'appareil se compose de deux colonnes de laiton A et D, entre lesquelles en est une plus petite. La colonne D porte un multiplicateur MN de 20 tours (fig. 678), qu'on fixe à différentes hauteurs au moyen d'une vis de pression, et qui augmente beaucoup la sensibilité de l'instrument. Ce multiplicateur est maintenu par deux articulations qui permettent, l'une de le renverser sur lui-même (fig. 681), l'autre de le placer horizontalement (fig. 682). La petite colonne est creuse, et dans son intérieur glisse un tube de laiton terminé par un godet *c*, plein de mercure, qu'on élève plus ou moins. La colonne A supporte un godet *a*, rempli égale-

nt de mercure, et représenté en coupe et en grandeur natu-
le dans la figure 680. Il est percé, en dessous, d'un trou capil-
re dans lequel s'engage la pointe d'une aiguille à coudre fixée
ne petite boule de laiton. Cette pointe se prolonge jusqu'au

Fig. 679.

Fig. 680.

rcure et tourne librement dans le trou. Quant au circuit mo-
e, il se compose d'un fil de cuivre rouge partant de la boule de
ton et se contournant, dans le sens des flèches, du godet *a* au
det *c*. Ses deux branches inférieures sont fixées à une planchette
bois mince, et tout le système est équilibré par deux petites
ules de laiton suspendues aux extrémités.
Ces détails connus, le courant d'une pile de 4 à 5 couples de

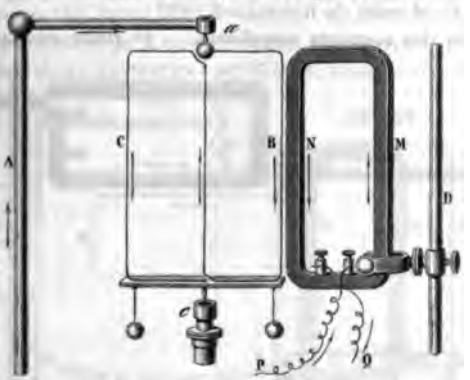


Fig. 681.

nsen, montant par la colonne A (fig. 678) jusqu'au godet *a*, par-
circuit BC, gagne le godet *c*, descend par la colonne cen-
t de là se rend par un fil P au multiplicateur MN, d'où il
enfin à la pile par le fil Q. Or si, avant de faire passer le
, on dispose le circuit mobile dans le plan du multiplica-
es branches B et M en présence, on observe qu'aussitôt que

le courant passe, la branche B est repoussée, ce qui démo deuxième loi; car dans les branches B et M les courants chant dans le sens des flèches, sont de sens contraires.

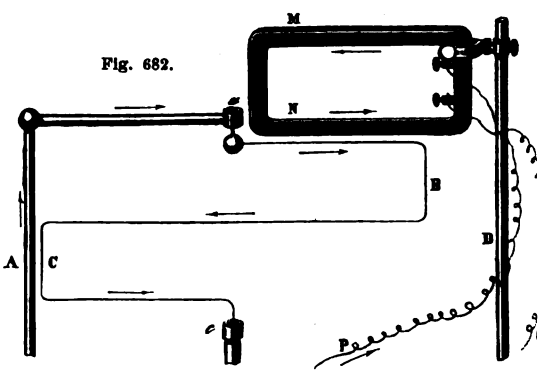
Pour démontrer la première loi, on renverse le multipl (fig. 681). Les courants sont alors de même sens, et si l'on la branche B avant le passage du courant, on la voit se rap dès qu'il passe, ce qui vérifie la première loi.

Dans l'appareil d'Obellianne les deux godets ne sont pa sés comme dans la figure 678, mais réunis en un godet compartiments concentriques isolés l'un de l'autre (fig. 67 des extrémités du circuit plonge dans le compartiment ce l'autre dans le compartiment *b*. Avec cette disposition, tion s'opère sans résistance dans le compartiment central dans le second, la pointe fixée à la boule *c* ne peut tourn déplaçant le mercure, d'où résulte une résistance assez surtout si le mercure n'est pas bien pur. Avec le godet rep dans la figure 680, cette résistance disparaît.

Dans les expériences qui précèdent et dans celles qui s il est souvent nécessaire de renverser le sens des coura arrive à ce résultat en faisant passer les courants dans d appareils qu'on nomme *commutateurs*. On en a construit férents systèmes. Nous décrirons plus loin le commuta Bertin (834) et celui de Ruhmkorff (893).

823. **Lois des courants angulaires.** — 1° *Deux courants*

Fig. 682.

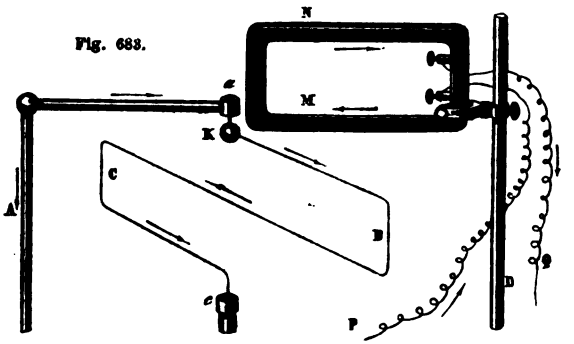


lignes, dont les directions forment un angle, s'attirent lo s'approchent ou s'éloignent tous les deux du sommet.

2° *Ils se repoussent si, l'un marchant vers le sommet d gle, l'autre s'en éloigne.*

n démontre ces lois au moyen de l'appareil de la figure 678, ' remplaçant le circuit mobile par le circuit BC (fig. 682). Dis- ant alors le multiplicateur horizontalement, de façon que son rant soit de même sens que dans le circuit mobile, si l'on

Fig. 683.

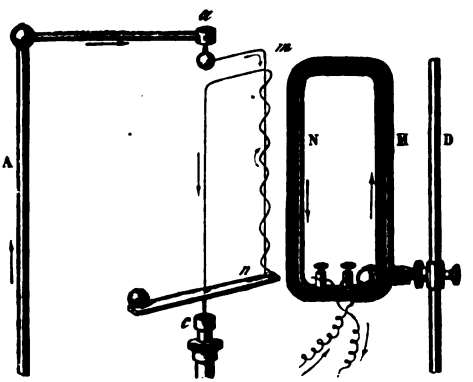


te celui-ci et qu'on fasse passer le courant, le circuit se rap- he aussitôt, ce qui vérifie la première loi.

our vérifier la seconde, il suffit de retourner le multiplicateur açon que les courants soient de sens contraires, et aussitôt il répulsion (fig. 683).

mpère a conclu de là qu'un courant angulaire tend à se redres- et que, *dans un courant rectiligne, chaque élément du cou-*

g. 684.



t repousse le suivant et en est repoussé. On démontre ce cipe en faisant voir que, lorsque le courant passe d'un bain ercure dans un petit fil de cuivre qui repose sur la surface

du liquide, ce fil est repoussé; mais la résistance qui résulte du changement de conducteur suffit pour produire le phénomène.

824. **Loi des courants sinueux.**— *L'action attractive ou répulsive d'un courant sinueux est la même, toutes choses égales d'ailleurs, que celle d'un courant rectiligne d'une longueur égale en projection.*

Cette loi se vérifie encore avec l'appareil d'Obellianne, en disposant le multiplicateur verticalement (fig. 684), et en plaçant auprès un circuit mobile *mn*, composé d'une partie rectiligne descendante et d'une partie sinueuse ascendante. Lorsque le courant passe, on n'observe ni attraction ni répulsion, ce qui fait voir que les actions contraires du multiplicateur sur le fil rectiligne et sur le fil sinueux sont égales.

Le principe des courants sinueux trouvera bientôt son application dans les *solénoïdes*, appareils formés de la combinaison d'un courant rectiligne avec un courant sinueux (835).

DIRECTION DES COURANTS PAR LES COURANTS

825. **Action d'un courant indéfini sur un courant perpendiculaire à sa direction.** — D'après l'action qui s'exerce entre deux courants angulaires (823), on détermine facilement celle qu'exerce un courant rectiligne PQ (fig. 685), fixe et indéfini, sur un courant mobile KH perpendiculaire à sa direction. Pour cela, soit OK la perpendiculaire commune à KH et PQ, laquelle est nulle si les deux lignes PQ et KH se rencontrent. Le courant PQ étant dirigé

Fig. 685.

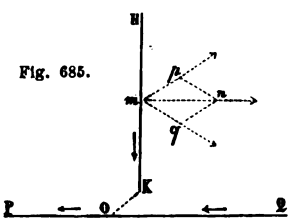
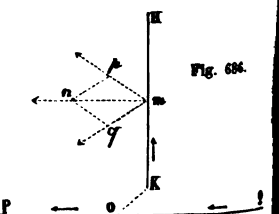


Fig. 684.



de Q vers P, dans le sens des flèches, soit d'abord le cas où le courant HK se rapproche du courant PQ. D'après la première loi des courants angulaires, la portion QO du courant PQ attire le courant HK, puisque ces courants se dirigent tous les deux vers le sommet de l'angle formé par leurs directions. Quant à la portion PO du courant PQ, elle repousse au contraire le courant KH; *ici* les deux courants sont de sens opposés par rapport au sommet

de l'angle. Représentant donc par *mq* et *mp* les deux forces, l'une attractive, l'autre répulsive, qui sollicitent le courant KH, forces qui sont de même intensité, puisque tout est symétrique des deux côtés du point O, ces deux forces se composent en une force unique *mn* (30), laquelle tend à entraîner le courant KH parallèlement au courant PQ, dans un sens opposé à ce dernier.

Si l'on considère le cas où le courant KH s'éloigne du courant PQ (fig. 686), on reconnaît facilement qu'il est encore entraîné parallèlement à ce courant, mais dans le même sens que lui.

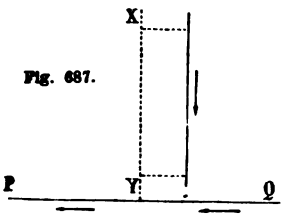


Fig. 687.

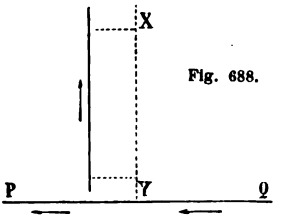


Fig. 688.

On peut donc poser ce principe général : *Un courant fini mobile, qui s'approche d'un courant fixe indéfini, est sollicité à se mouvoir dans une direction parallèle et opposée à celle du courant fixe ; si le courant mobile s'écarte du courant fixe, il est encore sollicité à se mouvoir parallèlement à ce courant, mais dans le même sens.*

Il suit de là qu'un courant vertical étant mobile autour d'un axe XY parallèle à sa direction (fig. 687 et 688), tout courant horizontal PQ a pour effet de faire tourner le courant mobile autour de

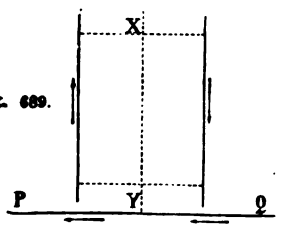


Fig. 689.

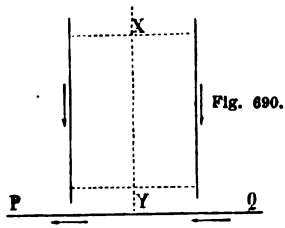


Fig. 690.

axe, *jusqu'à ce que le plan de l'axe et du courant soit devenu parallèle à* PQ, le courant vertical s'arrêtant, par rapport à l'axe, *du côté d'où vient le courant* PQ (fig. 687), ou *du côté où il se dirige* (fig. 688), *selon que le courant vertical est descendant ou ascendant*, c'est-à-dire selon qu'il s'approche ou s'écarte du courant horizontal.

On déduit encore du principe ci-dessus qu'un système

courants verticaux, mobiles ensemble autour d'un axe vert (fig. 689 et 690), est dirigé, par un courant horizontal PQ, d un plan parallèle à ce courant, quand des deux courants v caux l'un est ascendant et l'autre descendant (fig. 689); mais s'ils sont tous deux descendants (fig. 690), ou tous deux as dants, le système n'est pas dirigé.

826. **Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant tangulaire ou circulaire.** — Il est facile de reconnaître qu'un rant horizontal indéfini exerce sur un courant rectangulaire bile autour d'un axe vertical (fig. 691) la même action direct

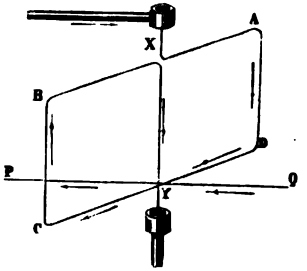


Fig. 691.

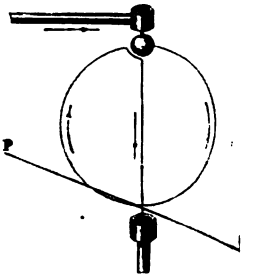


Fig. 692.

que ci-dessus. En effet, d'après la direction des courants m quée par les flèches, la portion QY agit par attraction non-seu ment sur la portion horizontale YD (loi des courants angulair 823), mais sur la partie verticale AD (loi des courants perpen culaires, 825). La même action a évidemment lieu entre la p tion PY, et les parties CY et BC. Donc *le courant fixe* PQ *tend diriger le courant rectangulaire mobile* ADCB *dans une positi parallèle à* PQ, *et telle que, dans les fils* CD *et* PQ, *le sens deux courants soit le même.*

Tout ce qu'on vient de dire d'un courant rectangulaire s'a plique exactement à tout courant circulaire (fig. 692).

ROTATION DES COURANTS PAR LES COURANTS

827. **Rotation d'un courant horizontal fini par un courant re tiligne horizontal indéfini.** — Les attractions et les répulsi qu'exercent entre eux les courants angulaires peuvent facilem se transformer en mouvement circulaire continu. Pour cela, m un courant OA (fig. 693), mobile autour du point O, dans un pl horizontal, et soit PQ un courant indéfini, aussi horizontal. L courants étant dirigés dans le sens des flèches, il s'ensuit que

OA, le courant mobile est attiré par le courant PQ, puisqu'ils
nt de même sens. Arrivé en OA', le courant mobile est attiré
r la portion NQ du courant fixe et repoussé par la portion PN.
même, en OA'', il est attiré par MQ et repoussé par PM, et
si de suite; d'où résulte un mouvement de rotation continu
ns le sens AA'A''A'''. Donc, *par l'effet du courant fixe indéfini*
), *le courant mobile* OA *tend à tourner d'un mouvement con-*
u dans une direction rétrograde par rapport à celle du cou-
nt fixe. Si le courant mobile, au lieu d'être dirigé de O vers
, l'était de A vers O, la rotation aurait lieu en sens contraire.
Si, les deux courants étant encore horizontaux, le courant fixe

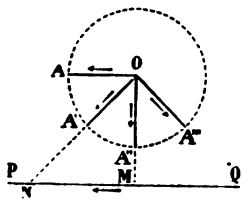


Fig. 693.

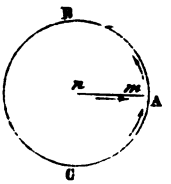


Fig. 694.

circulaire au lieu d'être rectiligne, son effet sera encore de
duire un mouvement circulaire continu. Soient, en effet, deux
rants placés dans un plan horizontal, l'un ABC (fig. 694), fixe
circulaire, l'autre *mn*, rectiligne et mobile autour du centre *n*.
courants, étant dirigés dans le sens des flèches, s'attirent
s l'angle *n*AC, car ils vont tous les deux vers le sommet (823,
. Dans l'angle *n*AB, au contraire, ils se repoussent; car l'un va
s le sommet, tandis que l'autre s'en éloigne. Les deux effets
courent donc pour faire tourner le fil *mn* dans le sens ACB.

**828. Rotation d'un courant vertical par un courant circulaire
zontal.** — Un courant circulaire horizontal, qui agit sur un
rant rectiligne vertical, lui imprime aussi un mouvement de
tation continu. On constate cette rotation au moyen d'un vase de
rre rouge autour duquel s'enroule une lame de même métal
ouverte de soie ou de laine, et parcourue par un courant fixe
. 695). Au centre du vase est une colonne de laiton *a*, terminée
une capsule qui contient du mercure. Dans celui-ci plonge un
t qui supporte un fil de cuivre rouge *bb*, recourbé à ses extré-
tés en deux branches verticales qui vont se souder à un anneau
-léger de cuivre rouge, plongeant dans de l'eau acidulée con-
ne dans le vase. Le courant d'une pile arrivant par le fil *m* se
d dans la lame A, d'où, après avoir fait plusieurs circuits au-
r du vase, il arrive à la lame B, et de là gagne, en dessous du
e, la partie inférieure de la colonne *a*. Montant dans cette co-

lonne, il passe dans les fils *bb*, dans l'anneau de cuivre rouge, dans l'eau acidulée et dans les parois du vase, d'où il revient à la pile par la lame D. Le courant se trouvant ainsi fermé, le circuit *bb* et l'anneau se mettent à tourner en sens contraire du courant fixe, mouvement dû à l'action du courant circulaire sur le courant des branches *bb*, comme il est facile de le voir d'après les deux lois des courants angulaires, la branche *b*, de droite, étant

Fig. 695.

attirée en avant par la portion A du circuit fixe, et la branche *b*, de gauche, l'étant en sens contraire par la portion opposée. Quant à l'action du courant circulaire sur la partie horizontale du circuit *bb*, elle concourt évidemment pour faire tourner dans le même sens; mais son action peut être rendue négligeable par la distance.

CHAPITRE VIII

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

829. **Actions des courants sur les aimants.**— Les courants exercent sur les aimants deux sortes d'actions, l'une directrice qui a déjà été étudiée (788), l'autre attractive ou répulsive; de plus, toutes ces actions sont réciproques; c'est-à-dire que de même que les courants agissent sur les aimants, réciproquement ceux-ci agissent sur les courants pour les diriger, les attirer ou les repousser. L'étude de ces actions et réactions entre les aimants et les courants se désigne sous le nom d'*électro-magnétisme*.

On a vu (788) que l'action directrice des courants sur les aimants consiste en ce que *le courant tend toujours à mettre l'aimant en croix avec lui, son pôle austral à gauche d'un observateur couché dans le courant, de manière que, regardant l'aimant, le courant entre par les pieds et sorte par la tête.*

L'intensité de l'action réciproque entre les aimants et les courants présente deux cas : 1° celui où l'on ne considère que l'action

pôle magnétique sur un *élément* de courant; 2° celui où l'on idère l'action sur une aiguille aimantée d'un courant *indé*- c'est-à-dire d'une très-grande longueur par rapport à l'ai- e, et surtout par rapport à sa distance du courant.

ns le premier cas, la force qui s'exerce entre le pôle magné- et l'élément électro-dynamique *est en raison inverse du é de la distance*, comme toutes les forces de la nature.

ns le second, en faisant osciller une aiguille aimantée à des nces variables d'un courant rectiligne indéfini, perpendicu- au plan d'oscillation, Biot et Savart ont trouvé que *l'inten- le la résultante des actions directrices de toutes les parties ourant sur l'aiguille est en raison inverse de la simple nce.*

est à remarquer que ces lois sont les mêmes que celles entre éléments de courants, et entre un courant fini et un courant lini (822).

ction attractive ou répulsive des courants sur les aimants se ate en suspendant, par une de ses extrémités, à un fil très- ne aiguille à coudre aimantée; puis on fait passer un cou- horizontal très-près de l'aiguille. On observe alors, suivant ns du courant, une attraction ou une répulsion.

us ces effets s'expliquent par l'action mutuelle entre les cou- (822), lorsqu'on adopte l'hypothèse des courants magnéti- d'Ampère (840).

0. Action directrice des aimants sur les courants. — L'action

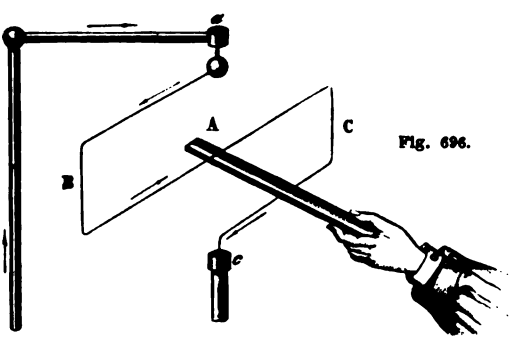


Fig. 696.

trice entre les courants et les aimants est réciproque. Dans périence d'Œrsted (fig. 658), l'aiguille aimantée étant mobile, is que le courant est fixe, c'est elle qui se dirige et se met en avec le courant. Si, au contraire, l'aimant est fixe et le cou-

rant mobile, c'est celui-ci qui se dirige et vient se mettre en croix avec l'aimant, le pôle austral occupant toujours la gauche.

Pour le démontrer, on prend l'appareil de la figure 678, sur lequel on pose le circuit mobile de la figure 682. Approchant alors un barreau aimanté (fig. 696), on voit le circuit tourner, et, après quelques oscillations, se mettre en croix avec le barreau. Ici encore ce sont les courants d'Ampère qui dirigent le courant mobile jusqu'à ce qu'il leur devienne parallèle et de même sens.

831. **Rotation des aimants par les courants.** — Les mêmes mouvements de rotation que les courants font prendre aux courants (827) se produisent entre les courants et les aimants, ce que Faraday, le premier, a démontré par l'expérience suivante (fig. 697).

Fig. 697. Fig. 698.

Au centre d'une large éprouvette remplie de mercure plonge un barreau aimanté A, de 20 centimètres de longueur environ, lesté à sa partie inférieure par un appendice de platine, et s'élevant de quelques millimètres au-dessus du niveau du mercure. A la partie supérieure du barreau est une cavité contenant du mercure. Un courant, montant par la colonne *m*, arrive au mercure et au barreau, d'où, rayonnant tout autour de celui-ci, il gagne une pièce annulaire de cuivre G, qui plonge dans le mercure le long de la paroi de l'éprouvette, gagne la colonne *n* et retourne à la pile. Or, dès que le courant passe, le barreau tourne autour de son axe avec une vitesse qui dépend de sa puissance magnétique et de l'intensité du courant. Quant au sens de la rotation, il dépend de celui du courant, et du pôle, austral ou boréal, qui flotte à la surface du mercure. Si c'est le pôle austral et si le cou-

t descendant, comme dans la figure 697, la rotation se fait
ı sens des aiguilles d'une montre. Elle a lieu en sens con-
ıi l'on renverse le sens du courant, ou si l'on retourne le
ı de manière que ce soit le pôle boréal qui flotte à la surface.
qu'on dispose l'expérience comme dans la figure 698, le
ı ne tourne plus sur lui-même, mais autour de l'axe ver-
ıssant par la tige C.

figures 699 et 700, correspondant, la première à l'expé-
de la figure 697, la seconde à celle de la figure 698, don-
ıur une plus grande échelle et sur un plan horizontal pas-
r la surface du mercure, la direction des courants auxquels
ı la rotation. Dans la figure 699, le pôle austral étant en
es courants d'Ampère autour du barreau marchent en sens

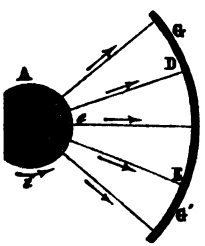


Fig. 699.

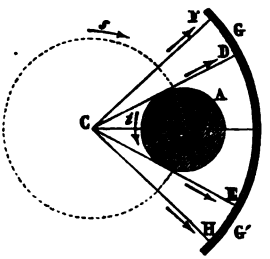


Fig. 700.

re des aiguilles d'une montre dans le sens de la flèche *i*
tandis que les courants qui rayonnent de la tige C vers l'an-
ıétallique G sont dirigés suivant les droites CD, CE... Par
d'après les effets des courants angulaires (823), un élé-
quelconque *e* du courant magnétique du barreau A est at-
r le courant CE et repoussé par le courant CD, ainsi qu'on
ı vu dans la figure 693; de là, rotation du barreau dans le
es aiguilles d'une montre autour de son axe.

la figure 700, les courants CD, CF, étant contraires à ceux
reau A, les repoussent, tandis que les courants CE, CH,
ne sens, les attirent. Le barreau est donc entraîné circu-
ent dans le sens de la flèche *s* autour de l'axe vertical qui
ıar la tige C.

Rotation des courants par les aimants. — L'action rotative
ırants sur les aimants est réciproque. On le vérifie par
ience suivante, due aussi à Faraday : sur un pied à vis ca-
est fixée une colonne de cuivre *b*D isolée par un contact
e, le long de laquelle s'élève plus ou moins un tube mé-

tallique entouré d'un faisceau aimanté AB (fig. 701). A
la colonne est un godet contenant du mercure dans lequ
une pointe d'acier. A celle-ci est fixé un circuit EF, c
rouge, dont les bouts portent des pointes d'acier, qui
dans un réservoir plein de mercure.

L'appareil ainsi disposé, on fait arriver le courant d'u
4 à 5 couples de Bunsen à
b; de là il monte dans la c
redescend par les deux bra
F, gagne le mercure par le
d'acier, et se rend par le
est de cuivre, à la borne *a*
revient à la pile. Or, si l
alors le faisceau aimanté
le montre le dessin, le cir
bile EF prend un mouveme
tation rapide dans un sens
l'autre, suivant qu'il est
l'action du pôle austral ou
boréal de l'aimant. Cette ro
due aux courants circulair
père autour des aimants,
qui agissent sur les branch
cales E, F, de la même ma
le courant circulaire sur l
ches *b,b,* dans la figure 69

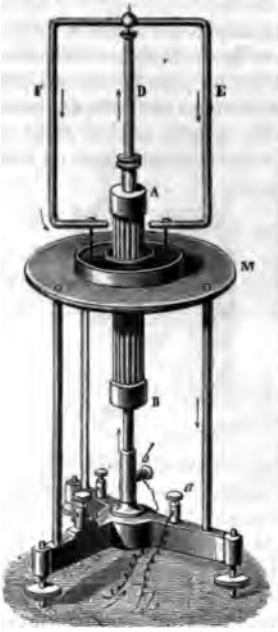


Fig. 701 (h = 44).

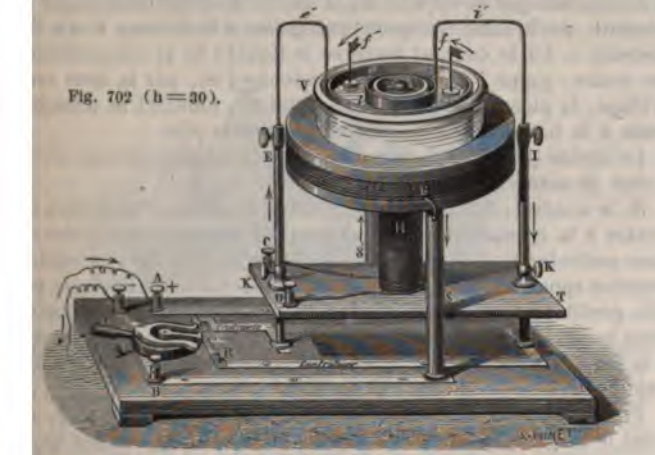
Dans cette expérience,
substituer au faisceau ai
solénoïde (835) ou un él
mant; pour cela deux borne
sur le pied de l'appareil, à
reçoivent le courant qui
courir le solénoïde ou l'électro-aimant. On constate
l'action d'un solénoïde sur le circuit mobile EF est identi
la même que celle d'un faisceau aimanté; d'où l'on voit
pareil qu'on vient de décrire peut servir à démontrer
entre les solénoïdes et les aimants.

833. **Rotation électro-dynamique et électro-magnét liquides.** — Dans les expériences d'électro-dynamique précédemment (827 et 828), la rotation s'obtient en fais un courant fixe sur un courant linéaire mobile. Il en est dans la rotation électro-magnétique de la figure 701. condition d'un circuit linéaire n'est pas nécessaire. On a

ɜ. 697 et 698) le mouvement de rotation transmis à une masse ıgnétique plus ou moins considérable; et dès la découverte de lectro-dynamique, on observa la rotation du mercure et de au par l'action des courants.

La figure 702 représente un appareil adopté par M. Bertin, ur démontrer la rotation électro-dynamique et électro-magnéque des liquides. Cet appareil, construit par M. Ducretet, se mpose d'un vase de verre VV, annulaire, c'est-à-dire ouvert à n centre de manière à être traversé par une bobine H. Celle-ci

Fig. 702 (h = 30).



t portée par une planchette T qu'on élève plus ou moins le long deux colonnes E, I, et qu'on fixe à l'aide de vis de pression , K. Dans l'intérieur de la bobine est un barreau de fer doux x, ı en fait un électro-aimant (848). Autour du vase V s'enroule ıe bobine G entre deux plateaux de bois, dont l'inférieur, qui rt de support au vase V, est fixé aux colonnes S, S'.

Le vase VV contient de l'eau acidulée de $\frac{1}{20}$ d'acide sulfuri-e et de $\frac{1}{20}$ d'acide azotique en volume; et dans le liquide plon-nt deux électrodes cylindriques de cuivre rouge e et i, sou-es à des fils de cuivre e' et i', qui reçoivent le courant d'une e à charbon de 4 couples par les colonnes E, I.

Enfin, tout le système est monté sur une planchette plus ande, qui porte sur la gauche un commutateur représenté ci-rès sur une plus grande échelle (fig. 703). Des pieds des qua-colonnes E, I, S, S', partent autant de lames de cuivre dont

trois se rendent au commutateur, et la quatrième à une borne A, en communication avec le pôle positif de la pile.

Ces détails connus, on peut obtenir avec l'appareil trois effets : 1° action de la bobine G seule ; 2° action de l'électro-aimant H seul ; 3° action simultanée de la bobine et de l'électro-aimant.

1° La figure 702 représente l'appareil disposé pour le premier effet. Le courant, arrivant par la borne A, gagne la colonne S', qui le conduit à la bobine G, sur laquelle il est *gauche*, c'est-à-dire dirigé en sens contraire des aiguilles d'une montre. Puis, redescendant par la colonne S, il gagne le commutateur qui le conduit, par la lame marquée *centripète*, à la colonne E et à l'électrode *e*. Ici le courant traverse le liquide de la circonférence au centre, gagne l'électrode *i*, la colonne I et, par la lame *centrifuge*, la pièce centrale du commutateur. Celui-ci le transmet enfin à la borne négative, qui le ramène à la pile.

Le liquide prend alors un mouvement de rotation *directe*, c'est-à-dire de même sens que dans la bobine.

Si le courant, dans le liquide, est *centrifuge*, c'est-à-dire du centre à la circonférence, la rotation est *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire à celui de la bobine. Dans les deux cas, on rend la rotation apparente pour de nombreux observateurs à l'aide de petits pavillons *f*, *f'*, fixés sur des disques de liége qui plongent dans le liquide, et sont entraînés avec lui. On a soin de les noircir à la fumée d'essence de térébenthine pour empêcher l'adhérence capillaire entre les disques et les électrodes *e*, *i*.

2° Si l'on veut expérimenter avec l'électro-aimant seul, on joint le fil positif de la pile à la borne C, et l'on réunit par un fil de cuivre les bornes D et B. Le courant passe d'abord dans l'électro-aimant H, puis gagne le commutateur par la borne B, se rend à la lame *centripète*, d'où il monte dans la colonne E, traverse le liquide dans le même sens que la première fois, redescend par la colonne I, et de là au centre du commutateur et à la borne négative, qui le conduit à la pile.

Si le pôle austral de l'électro-aimant est à la hauteur du vase de verre, comme dans la figure, les courants d'Ampère (841) y sont dirigés en sens contraire à celui des aiguilles d'une montre, et les pavillons avancent alors dans la même direction que ci-dessus.

Si l'électro-aimant est soulevé jusqu'à ce que sa ligne neutre soit à la hauteur du vase, les pavillons s'arrêtent ; en l'élevant davantage, les pavillons recommencent à tourner, mais en sens contraire.

3° Pour faire agir simultanément la bobine et l'électro-aimant, on attache le fil positif de la pile en C, et l'on joint par un conducteur les bornes D et A. Par suite, après avoir parcouru la bobine

[illegible] arrive par [illegible] la borne [illegible] parcourt ensuite le même circuit que dans la première expérience [illegible] les mêmes, seulement plus intenses, [illegible] action [illegible] de l'électro-aimant étant de même sens.

[illegible] de Barlow. — [illegible] qui [illegible] sont de petits appareils qui servent [illegible] renverse [illegible] des courants, et à les ouvrir [illegible] le terme. [illegible] un assez grand nombre [illegible] de [illegible] offre le montrer immédiatement le sens du courant. [illegible] petite planchette sur laquelle est un disque de [illegible] qu'on fait tourner sur un axe central [illegible]

Fig. 70.

fig. 70[illegible] entre deux arrêts [illegible] le disque son lames de cuivre dont l'une [illegible] est toujours positive [illegible] communication par l'axe et par une lame — avec la borne [illegible] l'électrode positive de la pile, l'autre [illegible] recourbée [illegible] val, est en communication par frottement au-dessous [illegible] une lame — qui se rend à la borne négative [illegible] opposée de la planchette sont deux bornes [illegible] adaptées deux lames élastiques de cuivre [illegible] la connue, le disque étant tourné comme le montre la courant qui arrive à la borne P gagne la pièce [illegible] la borne b, qui, par une seconde lame ou par un [illegible] conduit à l'appareil de la figure 702 [illegible] ant à la borne [illegible], le courant gagne la lame [illegible] la pièce la borne N qui le ramène à la pile.

[illegible] est tourné de manière que la [illegible] c et de c', les pièces [illegible] mes r, r', le courant ne passe pas [illegible] la lame o touchant r', le courant se rend à la borne [illegible] revient par b; il est donc renversé.

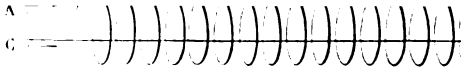


Fig. 704.

n'est complet qu'autant qu'une partie BC du fil est
vant l'axe dans l'intérieur de l'hélice. Avec cette disp
que le circuit est parcouru par un courant, il résult
été dit sur les courants sinueux (824) que l'action d
dans le sens de la longueur AB, est compensée par
rant rectiligne BC. Donc, *l'effet d'un solénoïde éq*
reusement à celui d'une série de courants circulai
parallèles.

836. **Action des courants sur les solénoïdes.** — Ce
de l'action des courants rectilignes fixes sur les co
rectangulaires ou circulaires (826), s'appliquant é
chacun des circuits d'un solénoïde, il en résulte q

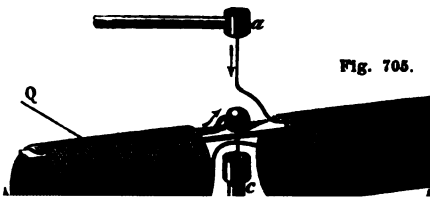


Fig. 705.

rige en dessous, parallèlement à son axe, un courant rectiligne PQ, qui passe en même temps dans les fils du solénoïde, on voit celui-ci tourner et se mettre en croix avec le courant, c'est-à-dire dans une position telle, que ses circuits se trouvent parallèles au courant fixe, et, de plus, dans la partie inférieure de chacun d'eux, le courant est de même sens que dans le fil rectiligne (826).

Si, au lieu de faire passer horizontalement un courant rectiligne au-dessous du solénoïde, on le fait passer verticalement sur le côté, on observe une attraction ou une répulsion, suivant que, dans le fil vertical et dans la partie du solénoïde la plus voisine, les deux courants sont de même sens ou de sens contraires (822).

837. **Action directrice de la terre sur les solénoïdes.** — Si l'on pose sur l'appareil de la figure 678 le solénoïde à suspension ci-dessus, et qu'on le dirige d'abord hors du méridien magnétique, on observe qu'aussitôt qu'un courant assez énergique passe dans le solénoïde, celui-ci entre en mouvement et s'arrête dans une direction telle, que son axe est parallèle à la direction de l'aiguille de déclinaison (657). De plus, dans la partie inférieure de ses circuits, le courant est dirigé de l'est à l'ouest.

Dans cette expérience, le solénoïde se dirigeant, sous l'influence du magnétisme terrestre, comme une aiguille aimantée, on nomme *pôle austral*, de même que dans les aimants, l'extrémité qui se dirige vers le nord, et *pôle boréal* celle qui se dirige vers le sud. On verra ci-après (842) comment Ampère a expliqué l'action directrice de la terre sur les solénoïdes.

838. **Action mutuelle des aimants et des solénoïdes.** — On observe entre les solénoïdes et les aimants identiquement les mêmes phénomènes d'attraction et de répulsion qu'entre les aimants. En effet, si l'on présente à un solénoïde mobile et parcouru par un courant un des pôles d'un fort barreau aimanté, il y a répulsion ou attraction, suivant que les pôles de l'aimant et du solénoïde sont en présence sont de même nom ou de noms contraires.

Réciproquement, le même phénomène a lieu si l'on présente à une aiguille aimantée mobile un solénoïde qu'on tient à la main, pendis qu'il est traversé par un courant. La loi des attractions et des répulsions des aimants (645) s'applique donc exactement aux actions mutuelles entre les solénoïdes et les aimants.

839. **Actions mutuelles des solénoïdes.** — Lorsqu'on fait agir l'un sur l'autre deux solénoïdes parcourus par un courant assez intense, l'un qu'on tient à la main, l'autre mobile autour d'un axe vertical (fig. 706), on observe, entre les extrémités de ces deux solénoïdes, des phénomènes d'attraction et de répulsion identiques à ceux que présentent entre eux les pôles des aimants; ces phé-

nomènes s'expliquent par la direction relative des courants dans les extrémités mises en présence (822).

Ampère a trouvé par le calcul que les attractions et les répul-

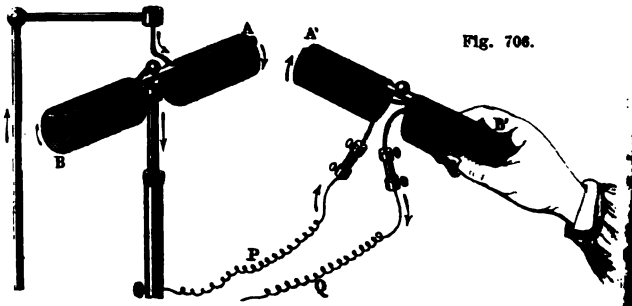


Fig. 706.

sions entre les pôles de deux solénoïdes sont en raison inverse du carré de la distance.

840. **Théorie d'Ampère sur le magnétisme.** — Se fondant sur l'analogie qui existe entre les solénoïdes et les aimants, Ampère a donné une théorie à l'aide de laquelle les phénomènes magnétiques rentrent dans le domaine de l'électro-dynamique.

On a déjà vu qu'au lieu d'attribuer les phénomènes magnétiques à l'existence de deux fluides spéciaux (647), Ampère les a attribués à des courants circulaires préexistants autour des molécules des substances magnétiques. Quand ces substances ne sont pas aimantées, les courants moléculaires ont lieu dans toutes les directions, et la résultante de leurs actions électro-dynamiques est nulle; mais sous l'influence d'un aimant ou d'un courant puissant ces courants s'orientent de manière à être non-seulement de même sens et dans des plans parallèles, mais à ce que leurs centres soient disposés en séries linéaires parallèles à l'axe du barreau qui s'aimante, en sorte que celui-ci devient un véritable *faisceau de solénoïdes*, dont l'ensemble agit comme un solénoïde unique.

En effet, à l'inspection de la figure 707, dans laquelle les courants moléculaires sont représentés par une suite de petits cercles intérieurs dans les deux extrémités d'un barreau aimanté en fer à cheval, on reconnaît que dans les parties contiguës les courants sont de directions opposées, et se neutralisent. Or il n'en est plus ainsi à la surface; là, les courants moléculaires en *a*, *b*, en *c*, n'étant pas neutralisés par d'autres courants, et les points *a*, *b*, *c*,... étant infiniment rapprochés, il en résulte une série d'éléments dynamiques de même sens, qui s'ajoutent pour donner

un courant circulaire [illegible] barreau. [illegible] effet se produisant dans chaque section du barreau [illegible] laire à l'axe [illegible] bien un [illegible] complet.

Malgré l'identité entre les [illegible] et les aimants [illegible] marque cette différence que, dans les premiers, les pôles sont aux extrémités mêmes, tandis que dans les aimants, ils en sont à une certaine distance, qui augmente avec le diamètre des barreaux. En effet, dans un solénoïde proprement dit,

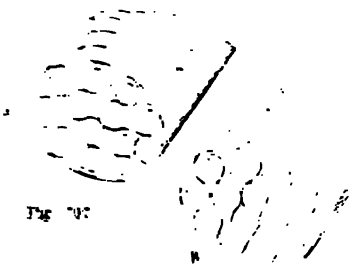


Fig. [illegible]

qui est simple, la position des pôles est fixe [illegible] mais dans les barreaux aimantés, qui sont [illegible] noïdes, ces derniers sont rectilignes [illegible] ndis que les solénoïdes placés près de [illegible] ux du centre surtout à leurs pôles [illegible] ur convexité vers l'axe du barreau [illegible] nsi de la partie médiane de [illegible] les de celui-ci, puisqu'ils [illegible] cation de la résultante [illegible] solénoïdes.

341. Direction des courants d'[illegible]

connaître dans quel [illegible] nts, soit le solénoïde [illegible] r un courant, et en [illegible] le austral [illegible] terre exerce [illegible] tie inférieure [illegible] qui revient au même [illegible] placé dans [illegible] pôle austral [illegible] le courant [illegible] Faraday [illegible]

Ce sont ces courants qui dirigent les aiguilles des l
les solénoïdes, et qui agissent sur les courants hor
verticaux, comme on va le voir ci-après (843 et 844).

ACTION DE LA TERRE SUR LES COURAN

843. Action directrice de la terre sur les courants v
Le courant terrestre qui exerce une action directrice
mants et sur les solénoïdes (837) agit aussi sur les c
leur imprimant tantôt une direction déterminée, tant
vement de rotation continu, suivant que ces courants
sés dans une direction verticale ou horizontale.

La première de ces deux actions, celle qui a pour e
ger les courants, peut se formuler ainsi : *Tout courai
mobile autour d'un axe qui lui est parallèle, vient
sous l'influence de l'action directrice de la terre, da
perpendiculaire au méridien magnétique, et s'arr
quelques oscillations, à l'est de son axe de rotation
est descendant, et à l'ouest, quand il est ascendant.*

Ce fait se constate au moyen d'un appareil formé de
de cuivre rouge *a* et K (fig. 708), d'inégale grandeu
grand, *a*, qui a environ 30 centimètres de diamètre,
son centre d'une ouverture au milieu de laquelle s'él
lonne de laiton *b*, isolée du vase *a*, mais communiqu

[redacted]

le là il monte dans le fil *c*, redescend [illegible] [illegible] du vase *a* au travers de l'eau [illegible] il atteint le fil *n*, qui le ramène à la [illegible] ainsi fermé, on voit le fil *e* se [illegible] l'arrêter à l'est de cette colonne [illegible]

Fig. 709.

[illegible] a lieu dans le dessin : mais [illegible] en faisant arriver le courant [illegible] arrête à l'ouest dans une position [illegible] qu'il prend lorsqu'il est descendant.

[illegible] à la tige à un seul fil de la figure 708 [illegible] fils de la figure 709, cette tige ne se dirige plus [illegible] tendant à se placer à l'est de la colonne *b* [illegible] égaux et de directions contraires qui se font équilibre.

[illegible] l'hypothèse du courant terrestre, ces phénomènes s'ex[illegible] par l'action d'un courant indéfini sur un courant perpen[illegible] à sa direction (825).

[illegible]4. Action de la terre sur les courants horizontaux mobiles au[illegible] d'un axe vertical. — L'action de la terre sur les courants ho[illegible]taux ne consiste plus à les diriger, mais *à leur imprimer [illegible] mouvement de rotation continu de l'est à l'ouest, en passant [illegible] le nord, quand le courant horizontal s'éloigne de l'axe de [illegible]tion, et de l'ouest à l'est, quand il s'en rapproche.*

[illegible]tte action sur les courants horizontaux se démontre au moyen [illegible]ppareil représenté dans la figure 710, lequel ne diffère de [illegible] de la figure 708 que parce qu'il n'a qu'un seul vase. Le cou[illegible] montant par la colonne *a* passe dans les deux fils *cc* et des[illegible] par les fils *bb*, d'où il revient à la pile. C'est alors que le [illegible] *ccb* se met à tourner d'un mouvement continu, de l'

l'ouest ou de l'ouest à l'est, suivant que dans les fils *cc* le s'écarte du centre, comme cela a lieu dans le dessin, ou qu'il s'en rapproche, ce qu'on obtient en faisant arriver le de la pile par le fil *m*, au lieu de le faire arriver par le fil

Fig. 710 (h=15)

Or on a vu (843) que l'action de la terre sur les fils v *bb* est détruite; c'est donc bien par son action sur les horizontales *cc* que la rotation se produit.

Cette action rotative du courant terrestre sur les coura zontaux est la conséquence de la rotation d'un courant h fini par un courant horizontal indéfini (827).

845. **Action directrice de la terre sur les courants fermés, autour d'un axe vertical.** — Si le circuit sur lequel agit est fermé, qu'il soit rectangulaire ou circulaire, ce n'est mouvement de rotation continu qui se produit, mais un directrice comme dans le courants verticaux (843), de laquelle *le courant placer dans un plan per laire au méridien magnét manière qu'il soit desce l'est de son axe de rotati un observateur qui reg nord, et ascendant à l'o*

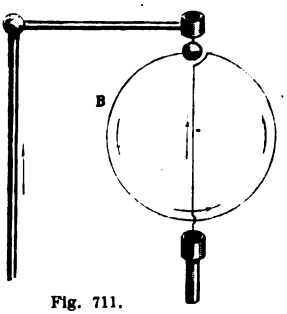


Fig. 711.

Cette propriété est un quence de ce qui a été di courants horizontaux et courants verticaux. En ef découle que, dans le circuit fermé (fig. 711), le courant, parties supérieure et inférieure, tend à tourner en sens co d'après la loi des courants horizontaux (844), et que par co il y a équilibre; tandis que, dans les parties latérales, l tend à se placer d'un côté à l'est, de l'autre à l'ouest, d *loi* des courants verticaux (843).

C'est cette action directrice de la terre sur les courants circulaires qui, répétée sur chacune des spires des solénoïdes, dirige ceux-ci suivant le méridien magnétique (837).

846. **Courants astatiques.** — Dans les expériences d'électrodynamique, il est nécessaire de soustraire les circuits mobiles à l'action directrice de la terre. Pour cela, on leur donne une forme symétrique des deux côtés de leur axe de suspension, de manière que les actions directrices de la terre sur les deux parties du circuit tendent à les faire tourner en sens contraires, et, par suite, se détruisent. Cette condition est remplie dans les circuits représentés dans les figures 681 et 682. C'est pourquoi on donne aux courants qui les parcourent le nom de *courants astatiques*.

CHAPITRE IX

AIMANTATION PAR LES COURANTS. ÉLECTROAIMANTS. TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

847. **Aimantation par les courants.** — D'après l'influence que les courants exercent sur les aimants, en tournant le pôle austral à gauche et le pôle boréal à droite (768), il est naturel de penser qu'en agissant sur les substances magnétiques à l'état neutre, les courants doivent tendre à orienter les courants d'Ampère. On observe, en effet, qu'en plongeant un fil de cuivre parcouru par un courant dans de la limaille de fer, celle-ci s'y attache abondamment, et retombe aussitôt que le courant cesse, tandis que l'action ne mêle sur la limaille de tout autre métal non magnétique.

L'action des courants sur les substances magnétiques est surtout sensible quand on enroule, comme l'a fait Ampère, un fil de cuivre recouvert de soie autour d'un tube de verre, et qu'on place dans celui-ci un barreau d'acier non aimanté. On observe qu'il suffit qu'un courant traverse le fil, même instantanément, pour que le barreau soit fortement aimanté.

Si, au lieu de faire traverser le fil par le courant de la pile, on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde, en mettant en communication l'un des bouts avec l'armature extérieure, et l'autre avec l'armature intérieure, on trouve encore que le barreau s'aimante. On peut donc aimanter également par l'électricité voltaïque et par l'électricité des machines.

L'enroulement du fil peut avoir lieu de gauche à droite en dessus, et alors on a une *hélice dextrorsum* (fig. 712); s'il se fait de gauche à droite en dessous, on a une *hélice sinistrorsum* (fig. 7

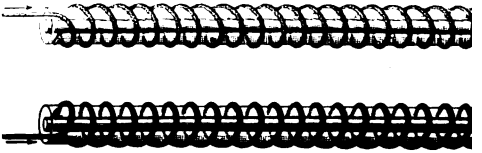


Fig. 713.

les figures 712 et 713. Il suffit de l'entourer, dans
gueur, d'un fil de cuivre recouvert de soie, afin d'isol
autres les circuits du fil; puis de faire passer le co
Un barreau d'acier acquiert ainsi, avec un courar
sant, une intensité magnétique très-grande, laquelle
le passage du courant, en décroissant toutefois lente
ce que le barreau arrive à un état de saturation sta
848. **Électro-aimants.** — On nomme *électro-aima*
reaux de fer doux qui s'aimantent sous l'influence
voltaïque, mais seulement d'une manière temporaire
coercitive du fer doux étant nulle, l'aimantation-dis
l'influence du courant cesse. Toutefois, si le fer n'e
tement pur, il conserve des traces d'aimantation p
sensibles. On dispose les électro-aimants en fer à che
et l'on enroule un grand nombre de fois, sur les de
un même fil de cuivre recouvert de soie, de manière à
bobines A et B. L'enroulement doit se faire en sens c

[redacted]

plus faciles à construire que ceux d'une seule pièce, et sont a
puissants.

La puissance d'un électro-aimant dépend : 1° de l'intensité
courant; 2° du nombre des
tours du fil; 3° du diamètre
du cylindre de fer sur lequel
ont enroulées les bobines.

Lenz et Jacobi ont donné
ur les électro-aimants les
is suivantes, qui ne sont
'approchées :

1° *La puissance d'un élec-
-aimant est proportion-
'le à l'intensité du cou-
t.*

° *Elle est proportion-
e au nombre des tours
'hélice magnétisante.*

*Elle est proportion-
à la racine carrée du
ètre du barreau.*

Fig. 714.

remière et la deuxième
nt une limite ; car le
u, en s'aimantant da-
e, approche de plus
s d'un état de satura-
563) au delà duquel
e de l'aimant reste
te, quoique l'intensité du courant et le nombre des tours
ugmentent.

econde cause limite encore la deuxième loi, c'est que les
e l'hélice, en s'enroulant les unes sur les autres, s'écar-
'er, et que par suite leur action magnétisante décroît ra-
t.

cul fait voir que la troisième loi n'est plus applicable
courant est très-intense, parce qu'alors la puissance de
imant croît beaucoup plus vite que la racine carrée du
du fer.

ssi cherché l'influence de la longueur du barreau, mais
ences ont été peu concordantes. Cependant, on peut
longueur est sans influence dans les électro-aimants
val, mais que dans les électro-aimants droits, la puis-
ente, jusqu'à une certaine limite,

gueur.

Enfin, le calcul et l'expérience montrent que, *pour obtenir le maximum d'effet d'un électro-aimant, la résistance de la bobine doit égaler la somme totale des résistances extérieures.* Il importe donc de combiner la longueur et le diamètre du fil de façon que cette condition soit satisfaite. Si le circuit extérieur présente une grande résistance, comme dans les lignes télégraphiques, on fera usage d'un fil fin et très-long; ce sera l'inverse si la résistance extérieure est faible.

On verra bientôt les applications qu'on a faites des électro-aimants dans les télégraphes électriques, dans les moteurs électro-magnétiques et dans l'étude des phénomènes diamagnétiques.

849. **Magnétisme rémanent.** — On nomme *magnétisme rémanent* une aimantation faible que conserve souvent le fer des électro-aimants après la rupture du courant. En effet, si le fer n'est pas parfaitement pur, on a vu qu'il est doué d'une certaine force coercitive (650), et c'est celle-ci qui donne lieu à l'aimantation qui persiste après le passage du courant.

Toutefois le magnétisme rémanent se manifeste aussi dans le fer parfaitement pur d'un électro-aimant; c'est lorsque celui-ci est en contact avec son armature. Dans ce cas, l'armature étant aimantée par influence, ses deux pôles, au moment de la rupture du courant, réagissent sur le fer de l'électro-aimant pour y maintenir deux pôles de noms contraires; de là une aimantation qui persiste tant que dure le contact, et cesse avec lui.

Dans les appareils où les électro-aimants fonctionnent par intermittences, le magnétisme rémanent produit un effet nuisible. Pour l'éviter, on est obligé de ne pas laisser s'établir un contact parfait entre les électro-aimants et leurs armatures.

* 850. **Mouvements vibratoires et sons produits pendant l'aimantation.** Lorsqu'une tige de fer doux s'aimante par l'influence d'un fort courant, elle rend un son très-prononcé, qui varie suivant que la tige est plus ou moins allongée, mais qui ne se produit qu'à l'instant où le courant est fermé et à l'instant où il est interrompu. Ce phénomène, qui a d'abord été observé par Page, puis par Delezenne, a surtout été étudié par M. de la Rive, qui l'attribue au mouvement vibratoire des molécules du fer par l'effet d'une succession d'aimantations et de désaimantations.

En interrompant et en rétablissant le courant à des intervalles très-rapprochés, ce savant a observé que, quelles que soient la forme et la grandeur des tiges de fer doux, on distingue toujours deux sons : l'un, qui est musical, et répond à celui que donnerait la barre en vibrant transversalement; l'autre, qui consiste en une suite de coups secs, correspondant aux alternatives du courant, est comparé par M. de la Rive au bruit de la pluie tombant sur un métal. Le son le plus éclatant, dit-il, est celui qu'on obtient en tendant une table d'harmonie, des fils de fer doux de 1 à 2 millimètres de diamètre, recuits et longs de 1 à 2 mètres. Ces fils, étant placés dans l'axe d'une ou plusieurs bobines traversées par des courants puissants, produisent un son

[illegible] fait [illegible] et [illegible] [illegible] [illegible]

852. **Parties constituantes d'un télégraphe électrique.** ties essentielles de tout télégraphe électrique sont : 1 qui engendre le courant; 2° le *fil de ligne*, qui le tran station à l'autre; 3° le *manipulateur*, qui règle les inte du courant à la station de départ; 4° le *récepteur*, qui les dépêches à la station d'arrivée.

Les piles étant déjà décrites, nous passons au fil de

853. **Fil de ligne.** — On distingue les lignes *aérienn raines* et *sous-marines*.

La ligne aérienne consiste en un gros fil de fer ga unit entre elles l télégraphiques. Ce sur des supports d fixés eux-mêmes teaux de sapin (fi

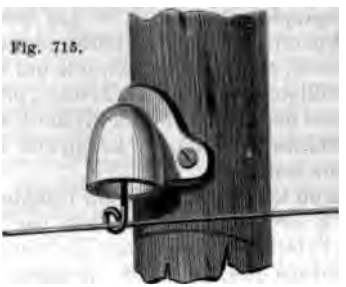


Fig. 715.

La ligne soute formée d'un fil d blable, mais recc enduit de gutta-pe bitume, qui l'isole lequel il est enfou

La ligne sous- destinée à relier entre eux les continents, par exemple l'Amérique à travers l'Océan. On ne fait plus ici usage fil, mais d'un véritable câble possédant une grande sol formé de trois parties : le conducteur, l'enveloppe isol mature protectrice. Le conducteur, ou *âme du câble*, ceau de 7 fils de cuivre rouge, de 1 millimètre de diam et tordus ensemble. Autour de ce faisceau est l'envelop qui consiste en quatre couches de gutta-percha ou de c alternant avec un nombre égal de couches d'un enduit mélange de sciure de bois, de résine de goudron et de cha, appliqué à chaud. Enfin, sur l'enveloppe isolant une couche de filin goudronné, et sur celui-ci un rev 10 fils d'acier de 2 millimètres de diamètre, garnis de chanvre goudronné, qui les protége contre l'actio de l'eau de mer. Les fils d'acier s'enroulent en hélice tr sur l'enveloppe isolante, comme on le voit dans la figu représente le câble dans le sens de sa longueur, tar figure 717 en donne une coupe transversale, qui, en deur, a 26 millimètres de diamètre. Son poids est d grammes par kilomètre. C'est un câble semblable qu 1869, unit Brest à Saint-Pierre, dans l'île de Terre-Ne

[illegible] tous ces [illegible] [illegible]
[illegible] la station [illegible]
[illegible] même [illegible]
[illegible] positif [illegible]
[illegible] d'arrivée [illegible]
[illegible] et plongeant [illegible]
[illegible] s'écoulant [illegible]
[illegible] dans le fil [illegible]
[illegible] circuit était fermé [illegible]
[illegible] le double avantage [illegible]
[illegible] distance [illegible]
[illegible] manipulateurs [illegible]

Fig. 714.

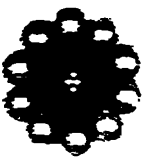


Fig. 715.

[illegible] la description [illegible]
du télégraphe correspondant.

Télégraphe à cadran ou à lettres. — Il existe plusieurs sortes [illegible] télégraphes à cadran. Celui qui est représenté dans les figures [illegible] 719 est destiné à la démonstration, mais son principe est [illegible] que celui des télégraphes électriques établis le long des [illegible] de fer. La figure 714 en représente le manipulateur, et la [illegible] 719 le récepteur. Le premier appareil communique [illegible] [illegible] à charbon Q, et les deux appareils sont en communication [illegible] deux fils métalliques, qui vont [illegible] fig. 718 [illegible] [illegible] de départ à la station d'arrivée, et l'autre [illegible] fig. [illegible] de celle-ci à la première. Enfin, les deux appareils sont [illegible] [illegible] d'un cadran portant les 25 lettres de l'alphabet, sur [illegible] se meut une aiguille. C'est la main de l'expérimentateur [illegible] tourner l'aiguille de la station de départ, mais c'est [illegible] qui fait marcher celle de la station d'arrivée.

[illegible] la pile le courant se rend par un fil de cuivre A, fig. 718, à [illegible] de laiton N en contact avec une roue métallique R, passe [illegible] seconde lame M, puis dans le fil O, qui joint l'autre sta[illegible] Là, le courant se rend dans la bobine d'un électro aimant [illegible] dans la figure 719, mais représente à part dans la [illegible] qui montre la partie postérieure de l'appareil. Cet [illegible] est fixé horizontalement à une extrémité, et à

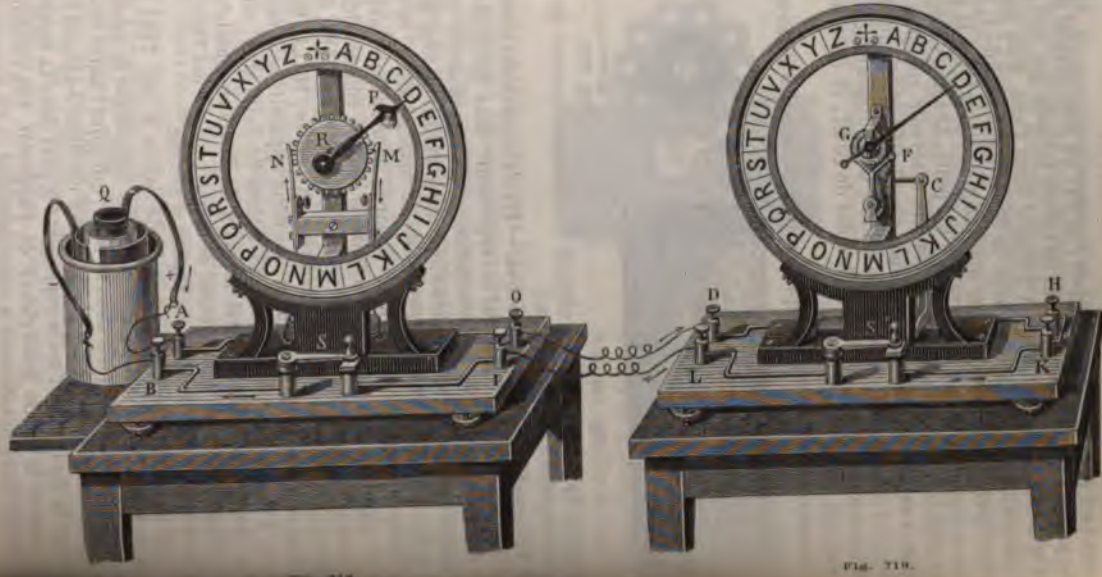


Fig. 718.

Fig. 719.

ıture de fer doux *a*, qui fait partie d'un levier coudé de son point d'appui *o*, tandis qu'un ressort à bou- le même levier en sens contraire.

ɔurant passe, l'électro-aimant attire le levier *a*C, tige *t*, vient agir sur un second levier *d*, fixé à un , lié lui-même à une '. Lorsque le cou- ɔmpu, le ressort *r* ier *a*C, et avec lui ɔces qui en dépen- résulte un mouve- t-vient qui se com- fourchette, laquelle une roue à rochet dents et dont l'axe le indicatrice. D'a- ıison de ses dents, cillation double du ı roue G est entraî- ɔnt, toujours dans le , par une des bran- ɔurchette, au moyen qui s'engagent dans

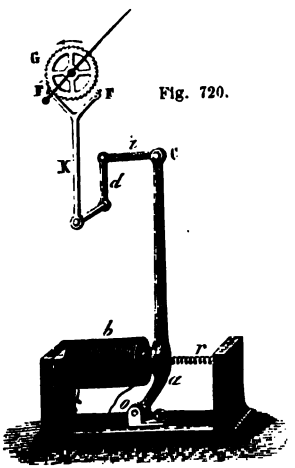


Fig. 720.

ɔndre compte des intermittences de l'électro-aimant, rter à la figure 718. La roue R porte 26 dents, dont 25 nt aux lettres de l'alphabet, et la dernière à l'inter- é entre les lettres A et Z. Quand, tenant le bouton P à fait tourner la roue R, l'extrémité de la lame N, d'a- ɔbure, est toujours en contact avec les dents; la lame aire, se termine par une came taillée de manière qu'il ivement contact et solution de continuité. Par consé- communications avec la pile étant établies, si l'on fait iguille P de 4 lettres, par exemple, le courant passe de N en M, et quatre fois il est interrompu. L'électro- la station d'arrivée devient donc quatre fois attractif, ois il cesse de l'être. Donc la roue G a tourné de 4 ɔomme chaque dent correspond à une lettre, l'aiguille ɔn d'arrivée marche exactement d'un même nombre de celle de la station de départ. La pièce S, dans les deux ıt une lame de cuivre, mobile sur [illegible] ırnière, et interrompre ou à fermer le cour[illegible] ce qui précède, il est facile de [illegible] npte com-

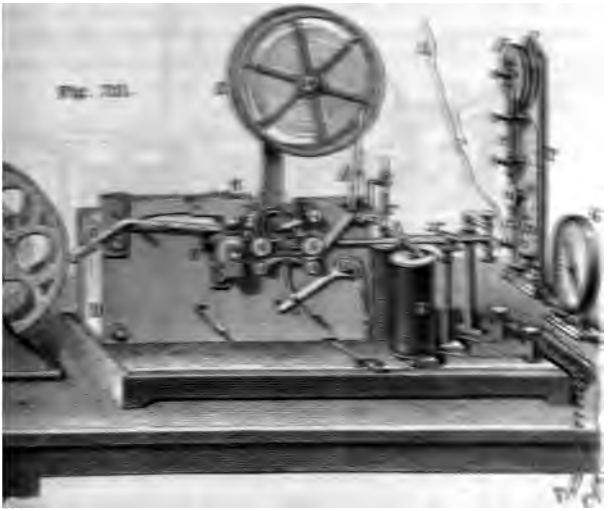
reil qui est au Havre, reproduisant fidèlement les mou
l'aiguille de Paris, s'arrête à la même lettre, et alors
qui reçoit la dépêche note cette lettre. Celle qui est à
tinuant à tourner toujours dans le même sens, arrêt
la lettre I, instantanément la seconde aiguille se fi
même lettre; continuant de la même manière pour le
N, A, L, tout le mot est bientôt transmis au Havre.

Pour appeler l'attention de celui à qui l'on écrit, on
station d'arrivée une sonnerie qui doit être introduite
rant toutes les fois que la correspondance est suspen
tente, mue par un électro-aimant, fait partir cette son
tôt que le courant passe, ce qui donne le signal qu'une
être transmise. Cette sonnerie sera décrite ci-après (
chaque station est pourvue des deux appareils ci-des

855. **Télégraphe électrique écrivant de Morse.** — O
un assez grand nombre de télégraphes électriques
imprimants. Celui qu'a inventé Morse, à New-York,
d'abord adopté dans l'Amérique du Nord, puis suc
dans toute l'Europe. Comme tous les télégraphes élec
lui de Morse se compose de deux appareils distincts,
lateur et le *récepteur*, réunis par un fil métallique qu
courant d'une pile, du premier appareil au second.

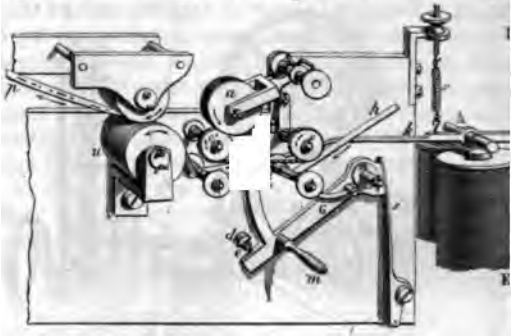
856. **Récepteur de Morse.** — Cet appareil est mun
vement d'horlogerie, renfermé dans une boîte BD (fi
dessus est un tambour R, sur lequel s'enroule une long

r d'un axe *x*. A ce levier est fixée une armature de fer doux
i est attirée quand le courant passe et qu'alors le levier
l est relevé par un ressort à boudin *r*, aussitôt que le courant
interrompu. A l'extrémité de droite sont deux vis qui servent
un écart plus ou moins grand, à régler l'amplitude des os-
ons du levier. A l'autre extrémité, en *i*, est un petit bouton
métal; on va voir que c'est la pièce qui écrit.



ns le télégraphe de Morse proprement dit, le levier *k*, qui
d'être décrit, se terminait en *i* par un poinçon qui, frappant
que oscillation un coup sec sur le papier, y formait un gau-
qui traçait les dépêches; mais outre que ce gaufrage donnait
cé peu lisible, il exigeait beaucoup de force, et par suite un
nt intense. Pour obvier à ce double inconvénient, plusieurs
ructeurs ont modifié le télégraphe de Morse, de manière à
les signaux à l'encre. Non-seulement ceux-ci sont alors plus
s, mais leur tracé demande beaucoup moins de force.
st ce genre de tracé que donnent les pièces représentées et
. En *a* est un rouleau garni d'une étoffe de flanelle, qu'on a
e maintenir imbibée d'une encre grasse en passant dessus un
u trempé dans cette encre. Au-dessous du rouleau, et en
t avec lui, est une chaîne sans fin qui s'enroule sur deux
s *o*, *o'*, mises en rotation par le mouvement d'horlogerie. Au
ns de la chaîne, à un *très-petit* intervalle, passe la bande

papier *ph* sur laquelle s'inscrit la dépêche. Tant qu
passe pas dans l'électro-aimant, le papier ne touche
mais aussitôt que le courant passe, l'armature A es
vier *k* s'abaisse, et le boulon *i* fixé à son extrémité
sur la chaîne, et la met en contact avec le papier.
déposant alors l'encre qu'elle a prise au rouleau
papier, à mesure qu'elle avance, un trait ou un po



temps que l'armature A reste en prise avec l'électr
à-dire suivant la durée du passage du courant. Si c
que pendant un temps très-court, la chaîne frap
ment et ne produit qu'un point (.); mais si le cor
taine durée, il se produit un trait (—). On peut d
à la station de départ, passer le courant pendant un
ou moins long, produire à volonté, à la station d'arri
un point, et, par suite, des combinaisons de traits
restait à donner à ces combinaisons une significati
C'est ce qu'a fait Morse en représentant les lettr
par les combinaisons suivantes, qui donnent le mo
mots et des phrases, en laissant un blanc entre c

Alphabet de Morse.

· —	a	· ·	i	· — ·
· — · —	ä	· — — —	j	· · ·
— · · ·	b	— · —	k	—
— · — ·	c	· — · ·	l	· · —
— · ·	d	— —	m	· · — —
·	e	— ·	n	· · · —
· · — · ·	é	— — —	o	· — —
· · — ·	f	— — — ·	ö	— · · —
— — ·	g	· — — ·	p	— · — ·
· · · ·	h	— — · —	q	— — · ·

857. **Manipulateur de Morse.** — [illegible]
ur laquelle est fixé un levier métallique [illegible]
en milieu sur un axe horizontal. [illegible]
ujours à être soulevée par un [illegible]
ue ce n'est qu'en appuyant [illegible]
vier s'abaisse et vient frapper [illegible]
hette sont trois bornes [illegible]
ui vient du pôle positif [illegible]
e ligne L, et la troisième [illegible]
ste; car il est bien entendu [illegible]
nt sont chacun pourvus d'un [illegible]

Fig. 722.

Ces détails connus. [illegible]
ur est disposé pour [illegible]
trémité *b* est alors [illegible]
le que le courant qui [illegible]
ièce métallique [illegible]
eur du poste [illegible]
dépêche : dans [illegible]
le levier vienne [illegible]
du poste, qui [illegible]
descend par [illegible]
uit au poste auquel [illegible]
mps qu'on [illegible]
r où va le courant [illegible]
ple choc sur [illegible]
se prolonge [illegible]
produit un trait.

[illegible]. **Parafoudre.** — [illegible]
erver l'emploi qui [illegible]
par l'influence [illegible]
, les fils [illegible]
lé suffisante [illegible]

telée dans toute sa longueur; latéralement et très-r
une plaque identique C, en communication avec la te

Par cette disposition, lorsque, sous l'influence
sphériques, la tension électrique devient assez gr
de ligne pour donner des étincelles redoutables, la
est dans le courant, donne écoulement par ses poi
cité vers la lame C et de là dans le sol, sans dang
ployés qui sont auprès. Si, malgré cette décharg
courant devient trop intense, le fil de fer enroulé
chauffe et fond, et dès lors toute communication
interrompue entre les appareils et la ligne.

Sur la planchette sont deux boutons de cuivre

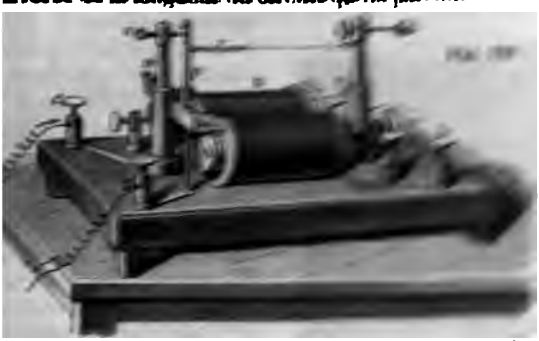
tivement en communication avec la borne Q et
dentèlée C, et au moyen d'une mannette M on pe

pour troubler tout à fait la transmission des dépêches
il est arrivé pendant plusieurs jours en octobre 1872.

Marche générale des courants dans le télégraphe de Morse.
résumant ce qui précède, on voit que le courant qui vient
le attaquant, arrivant par le fil de ligne L (fig. 721), tra-
l'abord le parafoudre P, puis le galvanomètre G, fle [illegible]
ns directement au récepteur, mais se rend d'abord au ma-
teur (fig. 723), où il entre en L, et dont il sort en A pour
re au récepteur, dans lequel il arrive par le fil C (fig. 72[illegible])
passe dans l'électro-aimant E, fait osciller le levier [illegible], et
a se perdre dans la terre par le fil T.

a contraire, on considère le cas, non plus où l'on reçoit une
e, mais où l'on en expédie une, le courant se transmet de
ière suivante. La touche B (fig. 723) étant alors abaissée
vier ab en contact avec le bouton a, le courant qui arrive
ile du poste par le fil P, sort du manipulateur par le fil L
ssant dans le galvanomètre et dans le parafoudre [illegible]
n par le fil de ligne au poste auquel on expédie.

Relais. — On sait (810) que l'intensité des courants est en
nverse de la longueur du circuit qu'ils parcourent [illegible]



poteaux qui portent les fils [illegible]
e dérivation (820) d'autant plus [illegible]
gne. De ces différentes causes [illegible]
ui correspondent [illegible]
que le courant ne soit plus [illegible]
pièces qui inscrivent [illegible]
On nomme ainsi un appareil [illegible]
de ligne, et servant à [illegible]
une *pile locale* de 5 ou 6 éléments [illegible]
ant d'autre usage que d'imprimer [illegible]

le fil de ligne. Pour cela, le courant de ligne, entrant
lais par la borne L (fig. 725), se rend dans un électro
d'où il va se perdre dans la terre par la borne T. Or,
que le courant de ligne passe dans le relais, l'électro-a
une armature A fixée à la partie inférieure d'un levier
qui oscille autour d'un axe horizontal.

A chaque oscillation, le levier p vient buter à sa
rieure contre un bouton n, et à cet instant le courar
locale, qui arrive par la borne c, monte dans la colon
dans le levier p, descend par la tige o, qui le condui
Z; de là il se rend à l'électro-aimant du récepteur, d'o
le fil T (fig. 721), pour revenir à la même pile locale
parti. Puis, quand le courant du fil de ligne s'interrom
aimant du relais n'étant plus attractif, le levier p, ent
ressort à boudin r, s'écarte du bouton n, comme le m
sin, et le courant de la pile locale ne passe plus. On v
le relais transmet au récepteur exactement les même
passage et d'intermittence que celles qui sont opérée
nipulateur dans le poste qui envoie la dépêche.

861. **Sonnerie électrique.** — La *sonnerie électrique*
appareil qui sert à
poste auquel on exp
construit de plusie
celle représentée da
726 est la *sonnerie é*
Elle se compose d'un
disposée verticalem
quelle est fixé un él
E, dans lequel arri
borne m, le courant
le courant d'une pil
l'électro-aimant le co
une lame élastique d
porte l'armature a
aimant, puis une lam
en contact avec l'arm
fin revient à la pile pa

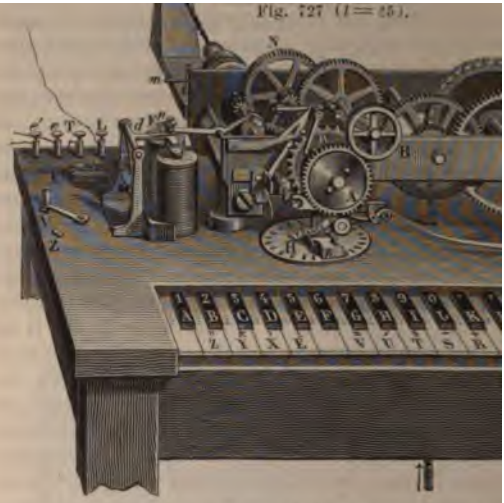
Fig. 726.

Ces détails connus,
que le courant passe
tro-aimant, l'armatu
rée et entraîne avec
teau P qui frappe un timbre T et le fait résonner. Or, au
choc, le contact cesse entre l'armature a et la lame C,

ouvert, l'électro-aimant devient inactif : mais la lame d'acier
enant aussitôt, en vertu de son élasticité, l'armature et [illegible]
vec la lame C, le courant passe de nouveau, et [illegible]
me grande rapidité, tant que le courant arrive [illegible]

62. Télégraphe imprimant de Hughes. — M. Hughes
a inventé un télégraphe imprimant qui donne [illegible]
quables de fidélité et de rapidité, cette [illegible]
lle du télégraphe Morse. L'appareil de Hughes [illegible]
ses détails, est fondé sur deux principes [illegible]
, qu'on n'avait pas appliqués jusqu'ici [illegible]
s. Le premier, c'est que la force motrice [illegible]
courant, mais à un poids de 60 kilogrammes [illegible]
à faire marcher tout l'appareil d'une [illegible]
remonte au moyen d'une pédale [illegible]
rse. En sorte que le courant [illegible]
embrayer et désembrayer une [illegible]
trique qui, au moment voulu, [illegible]
quelle on veut imprimer telle [illegible]
est que l'électro-aimant agit [illegible]
aphes électriques, c'est-à-dire [illegible]
asse qu'il tient son armature [illegible]
pas. Pour cela, le fer [illegible]
à sa partie inférieure, [illegible]
par l'influence de [illegible]
e ; mais le sens du [illegible]
t étant tel, qu'il [illegible]
possède déjà [illegible]
nante l'électro [illegible]
t sollicitée par [illegible]
it, comme [illegible]
le devant [illegible]
ches, dont [illegible]
oires [illegible]
rtent les [illegible]
ne, à partir [illegible]
qui [illegible]
actuel [illegible]
delà [illegible]
entre [illegible]
ux t[illegible]
é et [illegible]
ti de [illegible]
ographe [illegible]

Fig. 727 (1 = 25).



roue N, dont nous parlions ci-dessus, mène, à g
au-dessous, un pignon qui donne le mouvement
729), aux excentriques *o* et *i*, et au rouleau *c*, qu
la bande de papier (fig. 729 et 730). En un mot
par ce pignon qui porte les pièces principales de
Sur le devant du bâti est un rouleau B, qui es

[redacted]

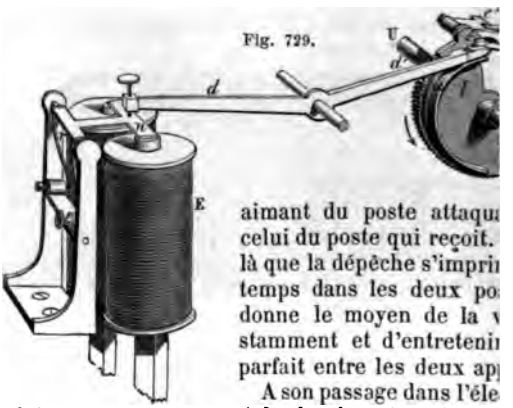
[illegible]
vier [illegible]
le bor[illegible]
e lign[illegible]
le courant [illegible]
e lign[illegible]
e conduit [illegible]
éa dirige[illegible]
ante: [illegible]
l'aimant qui [illegible]
Sur la gauche [illegible]
ant deux boutons [illegible]
Y et Z destinés [illegible]
à recevoir [illegible]
l à la transmettre [illegible]
un petit contact [illegible]
t mobile sur une [illegible]
et muni d'une [illegible]
e. En prenant [illegible]
n, on met [illegible]
avec le bouton [illegible]
t qu'on veut [illegible]
ettre. Enfin [illegible]
o-aimant, [illegible]

emobile sur un axe horizontal auquel [illegible]
faisant ressort, tendent constamment [illegible]
29. Sur celle-ci s'appuie un levier [illegible]
temps que l'armature [illegible]
r la roue [illegible] et y produire l'embrayage [illegible]
connu, le premier détail à étudier est celui représenté dans
re 728.

isque H est percé sur son pourtour de 28 trous, dans chacun
squels passe un goujon d'acier vertical [illegible]
levier qui reçoit son mouvement de l'une des touches [illegible]
. En sorte qu'à chaque trou du disque H correspond une
lu clavier, et que si l'on appuie sur la touche [illegible], par exemple
iatement le goujon correspondant s'élève au dessus du
H de deux millimètres environ. On a déjà vu que l'arbre [illegible]
ariot *h*, qui y est fixé, tournent avec une vitesse de deux
ar seconde. D'où résulte qu'à peine le goujon [illegible], par exem
t soulevé, il est rencontré par une plaque d'acier [illegible]
reste de l'appareil par des plaques d'ivoire, mais en com
ation métallique avec l'arbre J. Le courant, qui du [illegible]

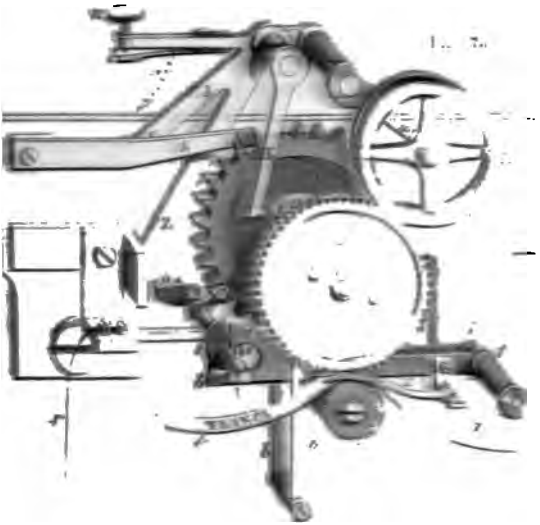
s'est rendu au goujon o'', passe donc actuellement da
et de là dans tout le bâti. De celui-ci, il se rend au bo
727), et si le contact pour transmettre est établi, il va
l'électro-aimant E, et enfin dans le fil de ligne L, qu
à l'électro-aimant du poste auquel est destinée la dép
il fait imprimer la lettre de la touche qu'on a abaissé
Au départ comme à l'arrivée, le courant passe da

Fig. 729.



aimant du poste attaqu
celui du poste qui reçoit.
là que la dépêche s'impri
temps dans les deux po
donne le moyen de la
stamment et d'entretenir
parfait entre les deux ap
A son passage dans l'éle
on a déjà vu que le courant le désaimante, et que
(fig. 729) font lâcher l'armature n. Or, le bras de le
alors soulevé par l'armature, le bras d' s'abaisse, et c
vement qui fait imprimer une lettre. Pour comprendr
se produit ici, observons d'abord que les deux arbre
paraissent n'en faire qu'un, sont indépendants l'un
l'arbre U, auquel est fixée la roue à rochet g, tour
mais l'arbre U', auquel est fixé le rochet c', ne peut
lorsque ce rochet est en prise avec les dents de la
tant que le bras de levier d' est soulevé, il soulève l
petit taquet c'', et avec lui le rochet c'; il n'y a d
brayage, et l'arbre U tourne seul. Mais aussitôt qu
s'abaisse, le rochet c', qui n'est plus soutenu, est ra
ressort v qui le presse de haut en bas, embraye avec l
entraîné par elle, transmet son mouvement au sect
et à l'arbre U'. Or c'est cet arbre qui porte les excen
(fig. 727 et 730), et qui soulève la bande de papier
impression. On voit donc combien le mécanisme que
de décrire joue un rôle important dans l'appareil. N
nons pas sans faire connaître la fonction de la lam

ut comme excentrique sur le levier [illegible]. A mesure que la rou-
ne dans le sens marqué par la flèche [illegible] l'excentrique [illegible] sou-
[illegible] bras d', et avec lui le taquet [illegible] rochet [illegible]. Le sort
ès un tour complet du secteur [illegible] de nouveau désen-
e. Le secteur l s'arrête donc [illegible] avec [illegible]



i ne tourne jamais que d'un tour. Il est encore à remarquer
xcentrique [illegible] ne sert pas seulement à faire désembrayer [illegible]
c', mais qu'en soulevant le bras d', il abaisse [illegible]. Or celui-ci
vant sur l'armature [illegible], le rabat et la met en prise avec
o-aimant, jusqu'à ce que le courant passant de nouveau
ayage se reproduise.

3. **Récepteur du télégraphe de Hughes.** — Ce mécanisme
mplique, et il nous est impossible de le décrire ici dans
es détails. La roue des types A, qui s'épère constamment
rouleau B (fig. 730), est animée d'un mouvement de [illegible]
continu, soit qu'elle imprime ou qu'elle n'imprime pas. Le
mportant ici est que cette roue soit toujours d'accord avec
iot h de la figure 728 ; c'est-à-dire qu'à l'instant où celui-ci
prise avec une des touches du clavier, la touche [illegible] par
le, il faut que la même lettre se trouve exactement au bas
oue des types ; car c'est à ce moment que la bande de pa
être soulevée, et que l'impression va se [illegible] effet

roue A, et cette lettre est imprimée. Aussitôt,
vient agir sur l'extrémité du levier *bb'*, auquel est
Celle-ci, à son extrémité supérieure, porte un e
fait marcher une roue à rochet fixée à l'axe du
il résulte qu'en s'abaissant, *y* fait tourner le rou
la bande de papier, juste d'une quantité égale à l
deux lettres; en sorte que le papier est prêt à re
sion d'une nouvelle lettre. Si l'on abaisse, par e
che R sur le clavier, le chariot *h* (fig. 728) est
goujon soulevé à l'instant précis où la lettre R
roue des types. Mais le papier venant la frappe
ment, la lettre R s'imprime, et ainsi de suite de to
inscrit sur la bande de papier.

La came *e* fixée sur l'axe U a un rôle important
gler le mouvement entre le poste qui transmet et
Pour cela, cette came s'engage entre les dents de
nomme la *roue correctrice*, et lorsqu'il n'y a pas c
presse les dents ou leur résiste, de manière à rec
de cette roue et en même temps de la roue A, ca
ne sont pas invariablement fixées sur leur arbre.

Le bouton *n'*, lorsqu'on appuie dessus, s'abai
temps les bras de levier I, Z, K; ce dernier po
s'engage dans un cran F, lié aux roues R et A. Lo
est en prise avec le cran, un des blancs de la r
juste en bas de la roue. On a donc un moyen de *m*
ce qu'on fait toujours quand on arrête, ou quan
qu'aux deux postes les appareils sont en désaccor
s'abaissant, écarte une lame S, qui, au moyen d'u
non visible dans le dessin, fait désembrayer les

ssus de la bande de papier. Il importe de fixer lequel des blancs, l'un servant à imprimer les 26 lettres, l'autre les s et les différents signes du clavier. De plus, on a vu que e dent de la roue des types porte une lettre et un chiffre, e lettre et un signe. Or, sur chaque dent, l'intervalle entre re et le signe est juste d'un demi-intervalle entre les dents, de la circonférence de la roue. Si donc on imprime à celle-ci n'est pas invariablement liée à son axe, un déplacement de tour dans un sens ou dans l'autre, les chiffres et les signes ent la place des lettres, et réciproquement. Ce résultat s'ob-au moyen du mécanisme suivant (fig. 731.)

la face postérieure de la roue correctrice est une plaque de

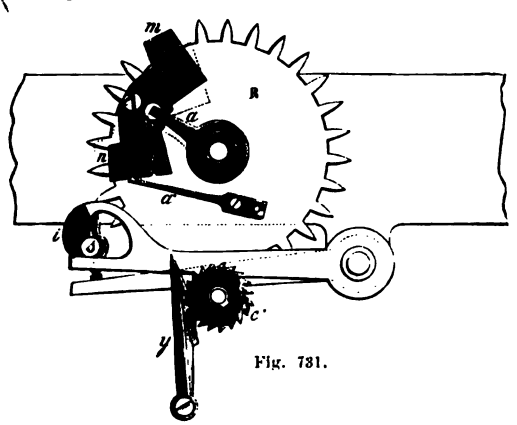


Fig. 731.

mn oscillant autour d'un axe *t'*, et percée d'un trou dans l s'engage l'extrémité d'un levier *a* lié à l'arbre de la roue pes. Par suite, toutes les fois que la pièce *mn* incline à ou à gauche, elle entraîne le levier *a* et avec lui la roue des qui tourne alors d'une demi-division, son déplacement étant par deux crans sur la plaque *mn* dans lesquels s'engage al-ivement la dent d'une lame élastique *a'*. Ces détails connus, l'on abaisse la première touche blanche du clavier, la came sant sur l'extrémité *m* de la plaque *mn* lui fait prendre la on représentée en ligne ponctuée, et, le levier *a* la suivant on mouvement, la roue des types tourne d'une demi-divi-elle est alors disposée pour imprimer les lettres. Puis, lors-veut imprimer un chiffre ou un signe, on appuie sur la se-touche blanche du clavier (la sixième) ; la came *e*, se trouva

synchronisme entre les deux postes s'obtient de la
vante : ayant donné aux appareils une vitesse telle
riot *h* (fig. 728) fasse sensiblement deux tours pa
des correspondants transmet une lettre quelconqu
à chaque tour du chariot. Si la même lettre se r
stamment à l'autre poste, le synchronisme est suf
la même lettre ne se reproduit pas, et que les car
més aillent en avançant de A à B, de B à C, cela
poste qui reçoit, le mouvement est plus rapide qu'
pédie. Alors, au premier poste, on ralentit le mouv
d'un régulateur à mouvement isochrone plus ou m

Fig. 732.

se compose d'une verge de laiton P, légèrement co
dement encastrée par son gros bout dans un suppo
pareil (fig. 732). A son autre extrémité, elle s'en
tige *o* articulée elle-même sur une manivelle *q*, qu
térieurement l'arbre U qui porte les cames. A la mê
la verge traverse une boule de cuivre *y*, à laquelle
fil d'acier qui, à son autre bout, est lié à une cré
fait marcher par un bouton B, ce qui permet de f

; mais si on la déplace, les vibrations deviennent plus s ou plus rapides, suivant que la boule a été rapprochée ou se de l'extrémité *o;* et comme le mouvement de rotation est mouvement vibratoire, il se ralentit ou s'accélère avec lui. nçoit donc que par le déplacement de la boule on arrive à er à l'appareil la vitesse de rotation à laquelle correspond le ronisme avec l'autre appareil.

65. Télégraphes électro-chimiques. — Les *télégraphes électro-chimiques* inscrivent les dépêches en signes colorés sur un r imprégné de cyanure jaune de fer et de potassium, ce sel décomposé par le courant d'une pile locale, dans le poste eçoit, toutes les fois qu'il passe au travers du papier. premier télégraphe de ce genre est dû à M. Bain, Écossais. ettres y sont représentées à l'aide des mêmes signes que dans égraphe de Morse, c'est-à-dire par des combinaisons de traits points; mais la dépêche est d'abord *composée,* dans le poste liteur, sur une longue bande de papier ordinaire. Pour cela, -ci est percée, à l'emporte-pièce, successivement de petits ronds qui représentent les points de Morse, et de trous allon- ui correspondent aux traits. Cela fait, la bande de papier est posée entre une petite roulette métallique et une lame élas- également métallique, qui font partie l'une et l'autre du cou- de la pile du poste. Or la roulette, en tournant, entraîne avec a bande de papier, dont toutes les parties viennent successi- nt passer entre la roulette et la lame. Par suite, si la bande apier n'était pas trouée, elle s'opposerait constamment au ge du courant, n'étant pas conductrice; mais en vertu des qu'on y a pratiqués, chaque fois que l'un d'eux passe, il y a ct entre la roulette et la lame, et le courant se continue pour faire marcher le relais du poste auquel on expédie, et tracer eu, sur un papier imprégné de cyanure, la même série de s et de traits que sur la bande de papier découpée.

66. Télégraphe transatlantique. — On a déjà vu le câble sous- n qui sert à la transmission dans le télégraphe transatlantique); or de la composition de ce câble et de son immense dé- pement il résulte des effets qui ne permettent pas d'appli- les télégraphes qui viennent d'être décrits. En effet, le câble -marin, formé de deux parties métalliques séparées par une he isolante, n'est autre chose qu'un énorme condensateur). Par suite, lorsqu'on lance dans l'âme du câble un courant if, par exemple, celui-ci agissant par influence sur les fils er qui forment l'armature du câble, ces fils se chargent d'é- icité négative, tandis que la positive est repoussée. De là des

des galvanomètres très-sensibles, et des condens
armature communique avec le circuit, et l'autre av
la grande résistance des parties liquides et par la s
densateurs, cette ligne artificielle rentre dans la c
ligne sous-marine. Lorsqu'on y fait passer un cour
que le dernier galvanomètre n'atteint son maximu
que plusieurs secondes après les premiers; mais s
les condensateurs, tous les galvanomètres atteigner
dans le même temps la même déviation, ce qui p
bien à la condensation qu'est dû le ralentissement

Pour combattre l'effet nuisible de la condensat
ciens anglais ont adopté deux systèmes. Dans le
M. Witehouse, au moyen d'un manipulateur inv
touches, on fait passer alternativement dans le câ
positif, puis un courant négatif. Un second flux, co
mier, vient ainsi le neutraliser aussitôt qu'il a ag
teur du poste auquel on expédie, et le câble, reve
tre, est prêt à recevoir un second flux.

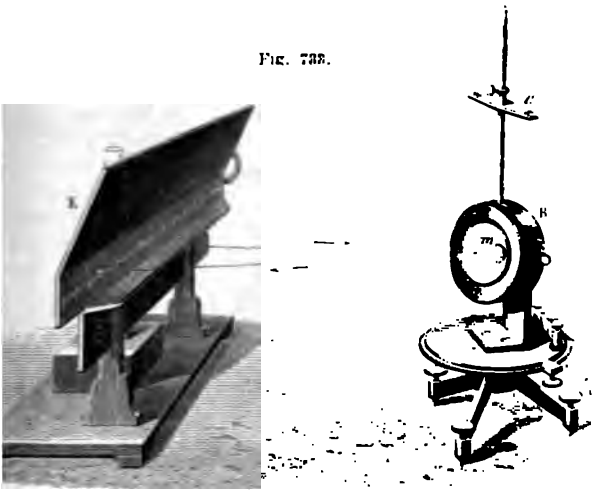
Dans le second système, dû à M. Varley, on étab
poste, entre la ligne et les appareils, un immense
d'environ 4 500 mètres carrés de superficie, qui ét
tion de continuité entre la ligne et les appareils. Il
lorsque Brest, par exemple, expédie à Terre-Neuv
le courant de la pile de Brest qui fait marcher l
Terre-Neuve, mais le condensateur. En effet, s
Brest on appuie sur la touche positive du manipu
positif qui s'élance dans le câble charge d'électrici
traire l'armature du condensateur qui ne commun
le câble, et repousse l'électricité de même nom que

ux de même nom s'élance dans le câble, et le ramène instan-
ment à l'état neutre, ce qui permet de faire passer aussitôt
ux nouveau, positif ou négatif.

ns ce mode d'opérer, le flux qui arrive au récepteur est ex-
ement faible, $\frac{1}{1000}$ environ du flux lancé dans le câble. De la
cessité de n'employer pour récepteurs que des appareils ex-
ement sensibles, condition qui est remplie par le galvano-
e de M. W. Thomson, lequel est tellement sensible qu'il per-
de télégraphier de Brest à Terre-Neuve avec une pile de cinq
les de Daniell; car il est indispensable ici de ne faire usage
l'un courant de ligne très-faible pour réduire l'effet induisant.

867. Galvanomètre récepteur de W. Thomson. — L'appareil
pteur du télégraphe transatlantique est un galvanomètre cir-
ire de W. Thomson modifié par M. Varley. Son circuit, qui

Fig. 733.



fil fin et très-long, présente une grande résistance. Au centre
m miroir de verre *m* (fig. 733), concave et suspendu à trois
le cocon. Derrière le miroir est fixé un petit barreau aimanté,
ut si léger, que miroir et barreau ne pèsent pas ensemble plus
décigramme. Un aimant *a*, qui peut se rapprocher plus ou
is, sert à maintenir le miroir dans une position déterminée
que le courant ne passe pas; de plus, il sert à faire équilibre
tion directrice de la terre afin de rendre le barre[illegible] oir
que astatique.

Fig. 734.

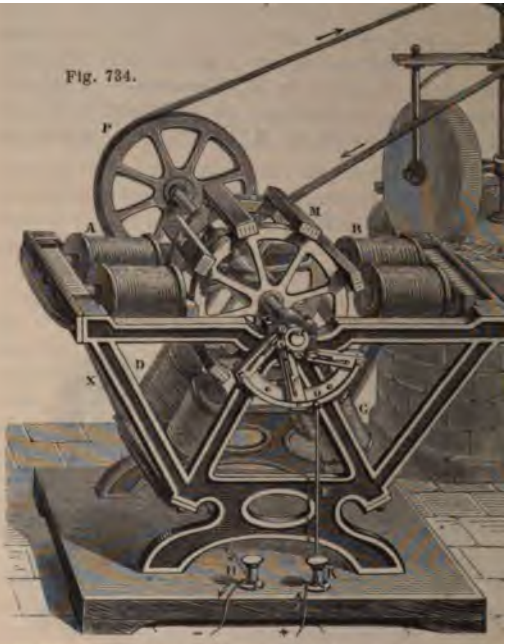


image revient vers l'ouverture tant que le courant
dans le galvanomètre; mais, dès qu'il arrive, le ba
roir dévient à droite ou à gauche suivant le sens

[redacted]

868. **Moteurs électro-magnétiques.** — [illegible]
ntatives pour utiliser la force attractive des électro-aimants
nme force motrice dans les machines. La figure [illegible]
e machine de ce genre construite par Froment. [illegible]
quatre électro-aimants puissants A, B [illegible]
fonte X. Entre ces électro-aimants est un système de [illegible]
ies de fonte, fixées sur un même axe horizontal [illegible]
leur contour huit armatures de fer doux M.
Le courant de la pile arrive en K, monte [illegible]
arc métallique O, qui sert à faire passer le courant [illegible]
nt dans chaque électro-aimant, de manière que [illegible]
les armatures M ne se contrarient pas [illegible]
me sens. Or cette condition ne peut être satisfaite [illegible]
le courant s'interrompt, dans chaque électro-aimant [illegible]
nt même où une armure passe devant [illegible]
cette interruption, l'arc O porte trois [illegible]
lles est fixée une lame d'acier terminée par [illegible]
ux de ces galets établissent la communication [illegible]
e un électro-aimant, le troisième avec deux [illegible]
voire *a* porte des cames de métal sur [illegible]
nativement les galets. Quand l'un d'eux porte [illegible]
rant passe dans l'électro-aimant correspondant [illegible]
ser aussitôt que le contact n'a plus lieu [illegible]
ants, le courant revient à la pile par [illegible]
ar cette disposition, les armatures M étant [illegible]
es par les quatre électro-aimants [illegible]
e prend un mouvement de rotation [illegible]
ne courroie sans fin, se transmet [illegible]
munique enfin à une machine [illegible]

CHAPITRE

[illegible]

9. **Induction par les courants discontinus.** — [illegible]
n nomme *induction* [illegible]
trisés sur les corps [illegible]
git des effets [illegible]
mination [illegible]
aître cette [illegible]
ou *courants induits* [illegible]
onducteurs métal[illegible]

et de l'ouverture du circuit qu'ils parcourent, au mo
bine à deux fils (fig. 735). On nomme ainsi un cylin
ou de bois, sur lequel s'enroulent en hélice, d'abord
cuivre, puis un plus fin, tous les deux recouverts
coton. Le gros fil, qui ne fait qu'un petit nombre d

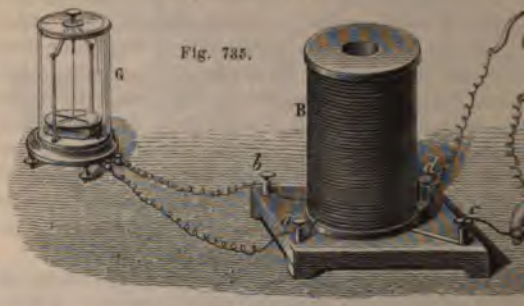
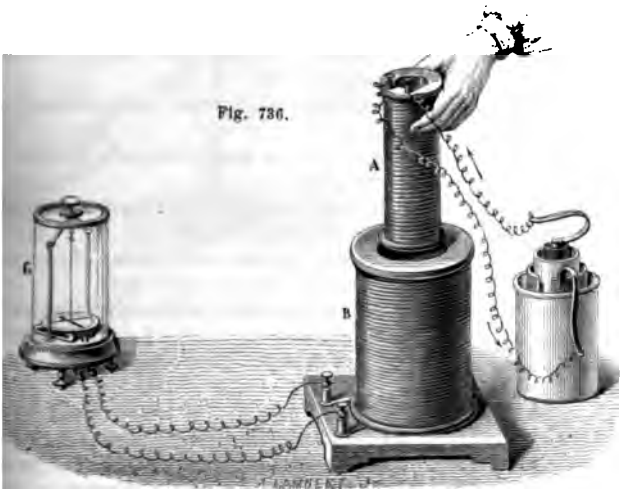


Fig. 735.

se terminer à deux bornes *c* et *d* fixées sur une p
porte la bobine; tandis que le fil fin, qui recouvre
qui fait un grand nombre de tours, aboutit à deux b
Ayant mis celles-ci en communication avec un galv
fixe à la borne *d* une des électrodes d'une pile, et ten
l'autre électrode, on la met en contact avec la borne
passer le courant dans le gros fil, mais dans le gros
Or on observe alors les phénomènes suivants :

Ces phénomènes peuvent être assimilés à ceux qui ont été étu-
iés dans l'électricité statique sous le nom d'électrisation par in-
uence 692); on peut, en effet, les considérer comme le résultat
e la décomposition et de la recomposition, molécule à molécule,
e l'électricité neutre du fil induit par l'influence de l'électricité
ui se propage dans le fil inducteur. Cette théorie de la produc-
on des courants induits est celle adoptée par M. de la Rive.

870. Induction par les courants continus. — Ce n'est pas seu-
ment à la fermeture et à l'ouverture du courant inducteur qu'un
ourant induit se développe. Il suffit qu'un courant s'approche



s'éloigne d'un circuit métallique fermé pour y faire naître un
rant induit. Pour le démontrer, soient une bobine creuse B à
seul fil fin et long (fig. 736), et une seconde bobine A à un seul
ussi, mais gros et court, laquelle est de dimension telle,
elle peut se placer dans la première. Or, la bobine A étant
courue par un courant, si on la plonge brusquement dans la
ine B, un galvanomètre en communication avec cette dernière
que, par le sens de sa déviation, qu'il se produit instanta-
ent dans la grosse bobine un courant *inverse*, qui cesse aus-
t, le galvanomètre revenant au zéro et y restant tout le temps
la petite bobine est dans la grosse. Mais si on la retire rapi-
ent, le galvanomètre accuse dans le fil fin un courant indu
ct.

tance du circuit, on remarque encore qu'il se pro
fin un courant induit, inverse si l'intensité du cou
augmente, direct si elle diminue.

871. **Conditions pour qu'il y ait induction, loi de**
sumant les deux paragraphes qui précèdent, on en

1° *Un courant qui commence fait naître un*
inverse, c'est-à-dire de sens contraire.

2° *Un courant qui finit produit un courant ind*
de même sens.

3° *Un courant qui se rapproche, ou dont l'inten*
donne lieu à un courant inverse.

4° *Un courant qui s'éloigne, ou dont l'inte*
donne naissance à un courant induit direct.

5° La distance restant la même, *un courant cont*
ne développe pas d'induction dans un circuit voi

6° Sur l'induction qui se produit entre un circu
courant en activité, quand leur distance varie, Le
suivante, connue sous le nom de *loi de Lenz*, laq
les lois 3 et 4 ci-dessus :

Lorsqu'un courant s'approche ou s'éloigne d'un
il se développe dans celui-ci un courant induit de
agissant suivant les lois de l'électro-dynamique (8
rant inducteur, il lui ferait prendre un mouvem
celui en vertu duquel il exerce son induction.
d'Ampère (840), cette loi s'applique également au

On verra plus tard (895) que les courants indui
verse sont égaux en quantité, mais ils ne le sont
en tension; c'est le courant direct qui a le moins

antérieure du plateau A est enroulé, en spirale, un fil de
e C, d'un millimètre de diamètre et de 25 à 30 mètres de
ieur. Les deux bouts de ce fil passent au travers du plateau,
ıu centre, l'autre à la partie supérieure, et se terminent à
pinces semblables à celles qui sont représentées en *m* et en
le plateau B. Dans ces pinces s'engagent deux fils de cuivre
l recouverts de soie, destinés à recevoir le courant inducteur.
r la face du plateau B, en regard de A, s'enroule un fil de

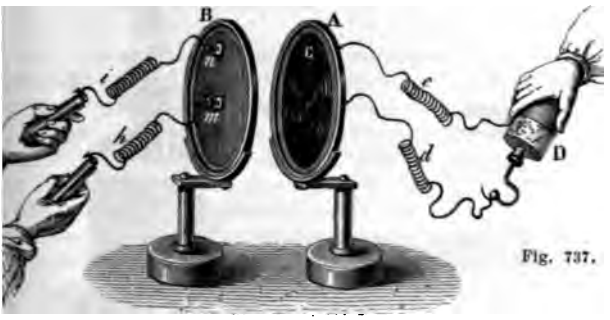


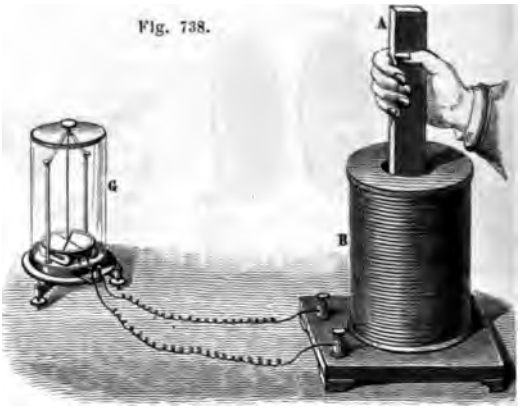
Fig. 737.

:e, aussi en spirale, mais plus fin que le fil C. Ses extrémités
tissent aux pinces *m* et *n*, qui reçoivent deux fils *h* et *i*, des-
à transmettre le courant induit. Les fils enroulés sur les pla-
ı A et B sont non-seulement recouverts de soie, mais chaque
iit est isolé du suivant par une couche épaisse de vernis à la
ne laque, condition indispensable avec l'électricité des ma-
es électriques, laquelle est toujours beaucoup plus difficile à
r que celle des piles, à cause de sa plus grande tension.
ur démontrer la production du courant induit par la décharge
ɜ bouteille de Leyde, on fait communiquer l'un des bouts du
avec l'armature extérieure de la bouteille, et l'autre avec le
net; à l'instant où l'étincelle part, l'électricité qui passe dans
C agissant par influence sur l'électricité neutre du fil enroulé
ɜ plateau B, un courant instantané prend naissance dans ce
ɔ effet, une personne qui tient dans les mains deux cylindres
:ivre en communication avec les fils *i* et *h*, reçoit une com-
ɔn dont l'intensité est d'autant plus forte, que les plateaux
ɔlus rapprochés; ce qui montre que l'électricité des machines
iques peut, aussi bien que celle de la pile, donner naissance
courants d'induction.
ppareil de Matteucci peut aussi servir à démontrer l'in-

tion par la variation de distance. Pour cela, on fait comm
les fils *c* et *d* avec les pôles d'une pile, et les fils *i* et *h*
galvanomètre. Approchant alors ou écartant les plateau
vanomètre fait voir qu'il y a courant induit sur le platea

873. **Induction par les aimants.** — On a vu que l'influe
courant aimante un barreau d'acier (847); réciproqueme
mant peut faire naître, dans les circuits métalliques, des

Fig. 738.



d'induction. Faraday l'a démontré au moyen d'une bobi
seul fil de 200 à 300 mètres de longueur, ouverte à l'inté
fixée sur une planchette (fig. 738). En dessous de celle-ci l
bouts du fil arrivent à deux bornes, desquelles partent d
de cuivre qui établissent la communication avec un galvan
Lorsqu'on introduit brusquement un fort barreau aiman
la bobine, on observe les phénomènes suivants :

1° Au moment où l'on introduit le barreau, le galvanom
dique, dans le fil, un courant induit instantané, inverse d
qui existe autour du barreau, en assimilant celui-ci à un sol
comme on l'a fait dans la théorie d'Ampère (840).

2° Aussitôt qu'on retire le barreau, l'aiguille du galvan
qui était revenue au zéro, indique un courant induit dire

On peut encore constater l'influence inductrice des aima
l'expérience suivante. On place dans la bobine à un seul
barreau de fer doux, et l'on approche brusquement un fort a
l'aiguille du galvanomètre dévie, revient au zéro aussit
l'aimant est fixe, puis dévie en sens contraire quand on l'é

duction est ici produite par l'aimantation du fer doux, dans
érieur de la bobine, sous l'influence du barreau aimanté.
n obtient les mêmes effets d'induction dans le fil d'un électro-
ant, si, en avant des pôles de celui-ci, on fait tourner rapide-
t un fort barreau aimanté, de manière que ses pôles agissent
essivement par influence sur ceux de l'électro-aimant; ou
encore, en formant deux bobines autour d'un aimant en fer
eval, et en faisant tourner une plaque de fer doux avec rapi-
devant les pôles de l'aimant; le fer doux, en s'aimantant par
ence, réagit sur l'aimant, et il en résulte dans le fil des cou-
s induits successivement de sens contraires.
induction par les aimants est une confirmation de la théorie
npère sur le magnétisme. En effet, dans cette théorie, les ai-
ts étant de véritables solénoïdes, toutes les expériences ci-
us s'expliquent par l'induction des courants qui parcourent la
ace des aimants. En un mot, l'induction par les aimants de-
t une induction par les courants.

'4. **Induction par les aimants dans les corps en mouvement.** —
o observa, le premier, en 1824, que le nombre d'oscillations
fait une aiguille aimantée, dans des temps égaux, quand on
rte de sa position d'équilibre, est très-affaibli par le voisi-
de certaines masses métalliques, et notamment du cuivre
e, qui peut réduire le nombre des oscillations de 300 à 4.
e observation conduisit le même physicien, en 1825, à un fait
moins inattendu : celui de l'action rotative qu'un disque de
re en mouvement exerce sur une aiguille aimantée.
n constate ce phénomène au moyen d'un disque de cuivre
e M, mobile autour d'un axe vertical (fig. 739). Sur cet axe
me poulie B, autour de laquelle s'enroule un cordon sans fin
va passer sur une poulie plus grande A. En faisant tourner
-ci avec la main, on imprime au disque M un mouvement de
ion rapide. Au-dessus du disque est un carreau de verre
auquel est adapté un pivot qui porte une aiguille aimantée
Dr, si le disque tourne d'un mouvement lent et uniforme, l'ai-
e dévie dans le sens du mouvement, et s'arrête à 20 ou 30
s du méridien magnétique, selon la vitesse de rotation du
e. Mais si cette vitesse augmente, l'aiguille finit par dévier de
de 90 degrés : alors elle est entraînée, décrit une révolution
re, et suit le mouvement du disque jusqu'à ce qu'il s'arrête.
ffet décroît à mesure que l'aiguille s'éloigne du disque, et varie
coup avec la nature de celui-ci. Le maximum a lieu avec les
ux; avec le bois, le verre, l'eau, il est nul. Babbage et Herx-
en Angleterre, ont trouvé qu'en représentant par 100 l'ac-

tion d'un aimant sur le cuivre, cette action, sur les autr
l'est par les nombres suivants : zinc, 95; étain, 46; p
antimoine, 9; bismuth, 2. Enfin, l'effet est très-affaibli
présente les solutions de continuité, surtout dans le
rayons; mais il reprend sensiblement la même inten
soude les solutions de continuité avec un métal quelc

Arago a reconnu que la force qui fait tourner l'aig

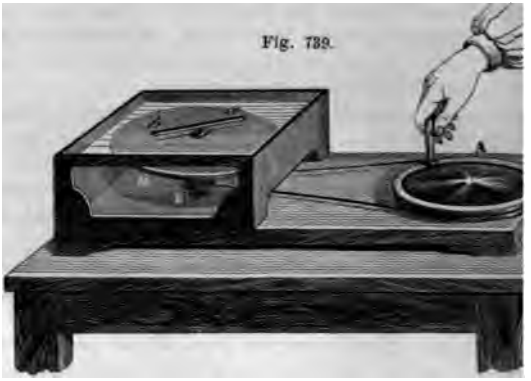


Fig. 739.

résultante de trois autres forces : l'une, perpendiculai
du disque, agit par répulsion sur l'aiguille; la second
dans le sens du rayon du disque, agit d'abord par rép
l'aiguille à partir de la circonférence du disque, puis
s'approchant du centre, pour se changer en force attr
de ce point, et devenir nulle en ce point même; enfi
sième force, parallèle au plan du disque, est perpendi
chaque point au rayon, et son action est attractive;
cette dernière force qui fait tourner l'aiguille. Arago ne
point l'origine de ces différentes forces; c'est Faraday qu
a fait voir qu'elles sont dues à des courants d'inductio
pés dans les disques par l'influence de l'aiguille aiman

875. **Induction par l'action de la terre.**— Faraday a r
premier, que le magnétisme terrestre peut développer de
induits dans les corps métalliques en mouvement, e
comme un puissant aimant placé dans l'intérieur du g
la direction de l'aiguille d'inclinaison, ou plutôt,
ment à la théorie d'Ampère, comme un circuit de cour
triques dirigés de l'est à l'ouest parallèlement à l'équate
tique. Il le constata en plaçant une longue hélice de fil
recouvert de soie dans le plan du méridien magnétique

ment à l'aiguille d'inclinaison; en faisant tourner cette hélice de 180 degrés autour d'un axe qui la traversait en son milieu, il observa qu'à chaque demi-révolution, un galvanomètre en communication avec les deux bouts de l'hélice indiquait un courant.

Pour démontrer les courants induits développés par l'action de la terre, Delezenne a construit l'appareil suivant, connu sous le

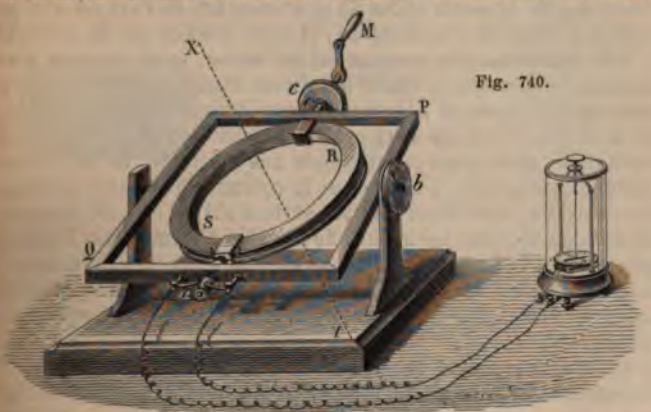


Fig. 740.

nom de *cerceau de Delezenne* (fig. 740). Il se compose d'un cerceau de bois RS, de près d'un mètre de diamètre, fixé à un axe *oa*, auquel on peut imprimer un mouvement de rotation plus ou moins rapide au moyen d'une manivelle M. L'axe *oa* est porté par un cadre PQ, mobile lui-même autour d'un axe horizontal. A l'aide d'aiguilles fixées à ces deux axes, un premier cercle gradué *b* indique l'obliquité du cadre PQ, et, par suite, de l'axe *oa* par rapport à l'horizon, et un deuxième cercle gradué *c* marque le déplacement angulaire imprimé au cerceau. Autour de celui-ci s'enroule une hélice un fil de cuivre recouvert de soie, dont les deux bouts arrivent aux deux anneaux métalliques d'un commutateur *a*, analogue à celui décrit ci-après dans l'appareil de Clarke (882), et dont l'usage est de ramener le courant à être toujours de même sens, quoique sa direction change à chaque demi-révolution du cerceau. Enfin, sur chacun des anneaux du commutateur s'appuient deux lames de laiton qui transmettent le courant à deux fils en communication avec un galvanomètre.

L'axe *oa* étant dans le méridien magnétique, et le cerceau RS perpendiculaire à la direction XY de l'aiguille d'inclinaison, si on imprime un mouvement de rotation lent, l'aiguille du gal-

verture. — Lorsqu'on ouvre un circuit fermé, par
courant voltaïque, on n'obtient qu'une étincelle à pe
si le fil qui réunit les deux pôles est court. Si l'on
circuit en tenant dans chaque main une électrode,
aucune commotion, à moins que le courant ne soit
Au contraire, si le fil est long, et surtout s'il est enr
nombre de fois sur lui-même, de manière à former
plis serrés, l'étincelle, qui est nulle à la fermeture
acquiert, quand on l'ouvre, une grande intensité, et
une commotion d'autant plus forte, que le nombre
plus grand.

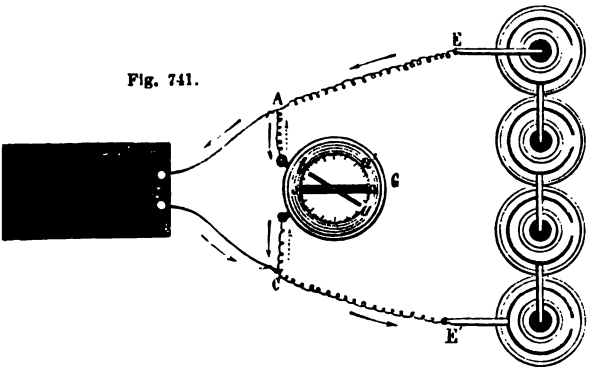
Faraday a expliqué ce renforcement du courant a
la rupture, par une action inductrice que le courant,
spire, exerce sur les spires voisines; action en vertu
se produit, dans toute la bobine, un courant induit
à-dire de même sens que le courant principal. C'e
induit qu'on désigne sous le nom d'*extra-courant d'*

Pour constater l'existence de l'extra-courant au
l'ouverture, Faraday a disposé l'expérience comme
figure 741. Des pôles d'une pile partent deux fils d
se rendent à deux bornes D et F, auxquelles aboutiss
d'une bobine à fil fin B. Sur le parcours des fils, des
partent deux autres fils qui se rendent à un galvano
suite, le courant parti du pôle E se bifurque en A
rants, l'un qui traverse le galvanomètre, l'autre la
revenir tous les deux au pôle négatif E'.

L'aiguille étant alors écartée par le courant qui v
on la ramène au zéro, et on l'y maintient par un ar

persiste est le circuit AFBDCA, et puisque, dans la partie CA, courant va de C en A, il faut donc qu'il parcoure tout le circuit s le sens AFBDC, c'est-à-dire dans le même sens que le cou-

Fig. 741.



t principal. Le courant qui apparaît ainsi au moment de l'ou-ture du circuit, est un extra-courant.

77. **Extra-courant de fermeture.** — Ce n'est pas seulement à stant où le courant finit que les spires d'une bobine, réagis-t les unes sur les autres, donnent naissance à un extra-cou-t; il en est encore ainsi lorsqu'on ferme le circuit; seulement d'après la loi générale de l'induction (869), le courant qui se sloppe est inverse, c'est-à dire de sens contraire au courant cipal. Il y a donc deux extra-courants : l'*extra-courant de eture*, ou *extra-courant inverse*, et l'*extra-courant d'ou-ure*, ou *extra-courant direct*.

es deux extra-courants sont de véritables courants induits, s qui diffèrent des courants induits proprement dits, en ce ceux-ci prennent naissance dans un fil voisin du fil induc-, tandis que les extra-courants se développent dans le fil in-eur même.

extra-courant d'ouverture, de même sens que le courant prin-l, s'ajoute à lui et augmente l'étincelle de rupture; au con-e, l'extra-courant inverse, de sens contraire à celui du cou-principal, en diminue l'intensité et annule l'étincelle au ent de la fermeture. C'est donc seulement à la rupture que a-courant peut donner des effets puissants.

ur recueillir l'extra-courant direct, on soude près de chacun outs du fil d'une bobine simple, c'est-à-dire à un seul fil, un id fil terminé par une plaque de cuivre; puis, tenant une

d'un électro-aimant. C'est encore là un phénomène à l'aimantation du fer doux dans l'intérieur de l En effet, à chaque désaimantation du fer, les cou développés à la surface réagissent sur la bobine, un courant de même sens que l'extra-courant.

878. **Induction dans les circuits non fermés.** — l précède, le courant inducteur a agi sur un circu qu'il agit sur un circuit ouvert, il y a encore in fois elle ne se manifeste plus par des courants accumulation d'électricités contraires aux deux circuit, *avec des tensions proportionnelles à l'in rant inducteur et au produit des longueurs des teur et induit.*

Par suite, si l'on rapproche les deux extrémité on observe identiquement les mêmes effets de te qu'on rapproche les deux conducteurs d'une ma C'est-à-dire que les effets obtenus sont alors plu de l'électricité statique que de l'électricité voltaïq

879. **Courants induits de différents ordres.** — l stantanéité, les courants induits peuvent eux-mêm fluence sur les circuits fermés, donner naissance courants induits, puis ceux-ci à d'autres, et ainsi d nière à produire des *courants induits de différent*

Ces courants, découverts par Henry, à New-. statent en faisant réagir les unes sur les autres u

CHAPITRE XI

MACHINES D'INDUCTION

). **Origine des machines d'induction.** — Aussitôt la découdes courants d'induction par Faraday (869), à une époque où ncipe de la corrélation des forces physiques était encore in-ı, on chercha à produire de l'électricité par l'induction d'ai-ɜ en mouvement. Pixii, en France, construisit le premier, 33, une machine de ce genre, laquelle fut bientôt modifiée axton, puis par Clarke, en Angleterre. Nollet, à Bruxelles, 50, augmenta considérablement la puissance de la machine arke en multipliant les aimants et les bobines. Mais c'est ut en 1854 que Siemens fit acquérir aux machines d'induc-une très-grande puissance par l'invention d'une nouvelle ıe, animée d'une vitesse de rotation considérable. En 1865, 'ilde, à Londres, accrut encore la puissance de ces machines ajoutant une seconde bobine de Siemens.

ns les machines de Pixii, de Clarke, de Siemens et de Wilde, par l'induction de barreaux aimantés puissants que des cou-prennent naissance dans des bobines tournant avec une le vitesse, et, à cause de cela, on les désigne sous le nom de *ıines magnéto-électriques*. A la fin de 1866, Siemens fit con-e une machine à une seule armature et sans aimants, mais laquelle il y a réellement induction magnétique par l'action terre, ou par un magnétisme rémanent (849). En 1867, ıdd, à Londres, construisit une machine aussi sans aimants, à deux armatures et plus puissante. Ces machines sans ai-s, dans lesquelles la production de l'électricité paraît due au ement seul, sont nommées *machines dynamo-électriques*. ɜ différents appareils, décrits ci-après, en remplaçant le tra-électro-chimique de la pile par un travail mécanique, offrent temple remarquable de la corrélation des forces physiques; l'époque même où vient d'être adoptée la théorie dynamique chaleur, elles en sont une éclatante confirmation, en faisant que le mouvement peut se transformer non-seulement en ur, mais en courants électriques puissants, et, par suite, mière et en magnétisme.

. **Appareil de Pixii.** — Cet appareil se compose d'un électro-ıt fixe BB', supporté par deux colonnes de bois (fig. 742).

Au-dessous est un faisceau aimanté, en fer à cheval, poı axe vertical, auquel on imprime un mouvement de rotati à l'aide de deux roues d'angle et d'une manivelle. Les] *b* du faisceau, rasant alors le fer doux des bobines B,B' tent par induction successivement en sens contraires.

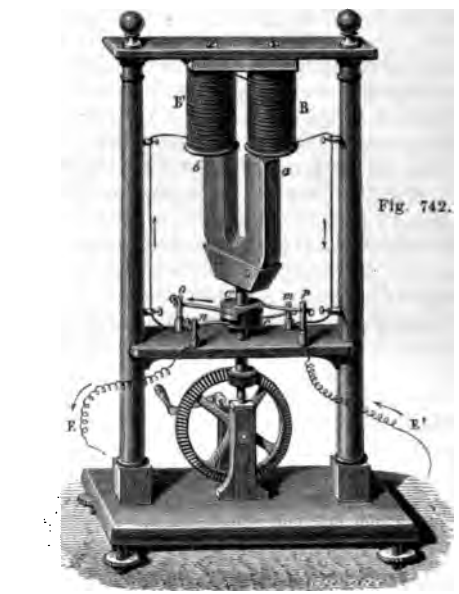


Fig. 742.

doux, à chaq tation et à ch aimantation, dans le fil d des courant qui se propa les fils para colonnes, ga commutateur là les fils E, voir ci-après pendant une complète du aimanté, il a en réalité deu de sens contra que, par l'eff mutateur *cc'*, rants sont r être toujours sens dans les

Quant à la t ces courants, elle est ident la même que celle des courants qu'on obtient dans l'ap Clarke, nous renvoyons à ce que nous allons dire de cet a le seul en usage aujourd'hui.

882. **Appareil de Clarke.** — Cet appareil est formé d'un aimanté A (fig. 743), très-puissant, recourbé en fer à ch appliqué verticalement le long d'une planchette. En av deux bobines B,B', mobiles autour d'un axe horizontal. bines sont enroulées sur deux cylindres de fer doux, reli bout par une plaque épaisse V, aussi de fer doux, et à bout, en regard du faisceau, par une plaque de laiton. A mière plaque est fixé un axe de cuivre qui porte un co teur *qo*, et à la plaque de laiton est fixé un axe portant, d la planchette, une poulie à laquelle on transmet le mouven moyen d'une courroie sans fin et d'une grande roue R.

Chaque bobine est formée d'un fil de cuivre très-fin, recouvert de soie, et faisant jusqu'à 1 500 tours. Un bout du fil de la bobine B se réunit, sur l'axe *k* (fig. 750), à un bout du fil de la bobine B', et les deux autres bouts viennent aboutir à une virole de cuivre *q*,

Fig. 744.

Fig. 743.

qui est fixée à l'axe, mais qui en est isolée par une enveloppe d'ivoire. On a soin que, dans les bouts qui se réunissent, le courant induit soit de même sens, ce qui s'obtient en enroulant les fils en sens contraires sur les deux bobines; c'est-à-dire que l'une est *dextrorsum* et l'autre *sinistrorsum* (847).

Lorsque les bobines tournent, le fer doux sur lequel chacune est enroulée s'aimante alternativement en sens contraires sous l'influence des pôles de l'aimant, et dans chaque fil il se produit un courant induit qui change de direction à chaque demi-révolution. En effet, suivons une des bobines, B par exemple, pendant une révolution complète devant les pôles du faisceau aimanté, en supposant de représenter par *a* et *b* les pôles de celui-ci, et par *a'* et *b'* ceux que prend successivement l'extrémité du fer de la

bobine. De plus, considérons cette dernière au moment (vient de passer devant le pôle austral *a* du faisceau (fig. 7 fer possède alors un pôle boréal dans lequel on sait que l rants d'Ampère sont dirigés dans le sens des aiguilles d'un tre (841). C'est le contraire qui semble indiqué par la flè

Fig. 745. Fig. 746.

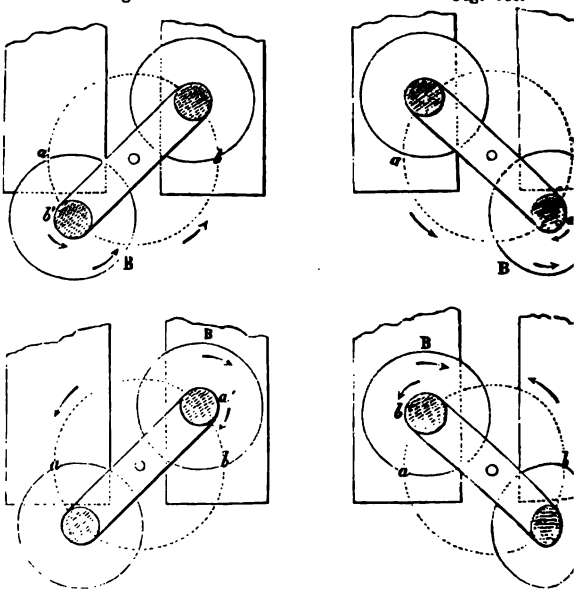


Fig. 747. Fig. 748.

mais qu'on observe que nous supposons les bobines vue comme elles le sont dans la figure 743, et que ce serait en le gardant par le bout qui rase l'aimant que les courants d'Am paraîtraient tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. posé, ces courants agissent par induction sur le fil de la bo pour y faire naître un courant de même sens; car la bobine s' gnant du pôle *a*, son fer se désaimante, et les courants d'Am vont cesser (871, 4°). L'intensité du courant induit dans la bo va donc en décroissant jusqu'à ce que la droite qui joint les des bobines soit perpendiculaire à celle qui joint les pôles du faisceau. A ce moment, le magnétisme est nul dans le mais aussitôt, s'approchant du pôle *b*, il s'aimante en sens traire, et prend un pôle austral (fig. 746). Or les courants d'

alors dirigés dans le sens de la flèche *a'*; et comme ils
ent, ils développent dans le fil de la bobine un courant
71, 1°), lequel se trouve être de même sens que celui
veloppé dans le premier quart de révolution. De plus,
courant se superpose au premier, puisque en même
la bobine s'éloigne de *a*, elle s'approche de *b*. En ré-
dant la demi-révolution inférieure de *a* en *b*, le fil de la
été successivement parcouru par deux courants induits
sens; et si le mouvement est assez rapide, on peut pen-
demi-révolution admettre un courant unique.
e raisonnement appliqué aux figures 747 et 748 fait voir
ant la demi-révolution supérieure, le fil est encore par-
un seul courant, mais de direction opposée à celle du
endant la demi-révolution inférieure. D'ailleurs, tout ce
d'être dit de la bobine B s'applique évidemment à la bo-
Toutefois, les bobines étant l'une *dextrorsum*, l'autre
um, pendant chaque demi-révolution inférieure ou su-
les courants sont constamment de même sens dans les
a demi-révolution suivante, ils changent tous les deux,
encore de même sens l'un par rapport à l'autre.
tateur. — Les figures 749 et 750 donnent, sur une plus
helle, l'une une vue perspective, l'autre une coupe ho-
lu commutateur de Clarke. Destiné à redresser les cou-
natifs qui se développent dans les deux bobines, c'est-
s ramener à être toujours de même sens dans les lames
. 749), il se compose d'un cylindre isolant d'ivoire ou
dans l'axe duquel est un cylindre de cuivre *k* (fig. 750)
dre diamètre, fixé à l'armature V et tournant avec les
Sur le cylindre d'ivoire est d'abord une virole de laiton
plus en avant, deux demi-viroles *o*, *o'*, de laiton, com-
isolées l'une de l'autre. La demi-virole *o'* est en com-
n avec l'axe *k* par une vis *r*, et la demi-virole *o* l'est avec
par une languette *x* qui les unit. Enfin, sur les faces la-
n bloc de bois M (fig. 749) sont deux plaques de laiton
lesquelles sont maintenues par des vis de pression deux
tiques de laiton *b* et *c*, qui s'appuient successivement
mi-viroles *o* et *o'* pendant la rotation.
ails connus, on a déjà dit que deux bouts des fils des
eux de même sens, viennent aboutir à l'axe métallique
suite à la demi-virole *o'*, tandis que les deux autres
ore de même sens entre eux, se réunissent à la virole *q*,
te à la demi-virole *o*. Les pièces *o*, *o'*, sont donc con-
les pôles des courants qui se développent dans les bo-

bines, et comme ceux-ci sont alternativement de sens contraires, les pièces *o*, *o'*, sont elles-mêmes alternativement positives et négatives. Si l'on considère le cas où la demi-virole *o'* est positive, le courant descend par la lame *b*, suit la plaque *m*, arrive en *n* par le fil conjonctif *p*, monte en *c*, et se ferme au contact de

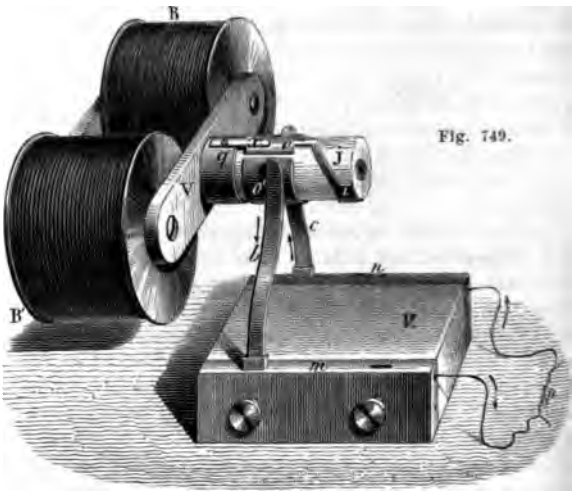


Fig. 749.

la pièce *o*; puis, lorsque, par l'effet de la rotation, *o* prend la place de *o'*, le courant conserve la même direction, car, comme il est alors renversé dans les bobines, *o* est devenu positif et *o'* négatif; et ainsi de suite tout le temps qu'on fait tourner les bobines.

Avec les deux lames *b* et *c* seules, les deux courants contraires qui partent des deux demi-viroles *o* et *o'* ne pourraient se réunir. Pour fermer le courant, il faut faire communiquer les deux pièces *m* et *n* entre elles, au moyen d'un conducteur quelconque. On ferme aussi le courant au moyen d'une troisième lame *a* (fig. 749) et de deux appendices *i*, dont un seul est visible sur la figure. Ces deux appendices sont isolés l'un de l'autre sur le cylindre d'ivoire, mais communiquent respectivement avec les pièces *o*, *o'*. Toutes les fois que la lame *a* touche un de ces appendices, elle est en communication avec la lame opposée *b*, et le courant est fermé, car il passe de *b* en *a*, puis gagne la lame *c* par la plaque *n*. Au contraire, tant que la lame *a* ne touche pas un des appendices, le courant est interrompu.

Pour les effets physiologiques, l'emploi de la lame *a* accroît

aucoup l'intensité des commotions. Pour cela, on fixe en *n* et *m* deux longs fils de cuivre contournés en hélice et terminés r deux cylindres *p* et *p'*, qu'on prend dans les mains. Alors, nt que la lame *a* ne touche pas les appendices *i*, le courant sse dans le corps de l'expérimentateur, mais sans effet bien apéciable; tandis que chaque fois que la lame *a* est en contact ec l'un des appendices *i*, le courant, comme on l'a vu ci-des-s, se trouve fermé par les pièces *a* et *c*, et cessant alors de pas-r dans les fils *np*, *mp'*, il se produit dans ceux-ci et à travers le

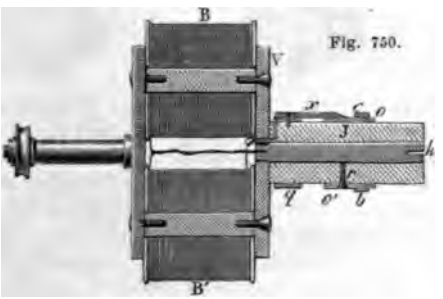


Fig. 750.

rps un extra-courant direct, qui fait éprouver une violente commotion. Celle-ci se renouvelle à chaque demi-révolution, et comme ntensité des courants induits est en raison inverse de leur durée 96, 1°), plus on tourne vite, plus les commotions sont fortes, squ'à une certaine limite cependant; ce qui est dû à ce qu'avec e trop grande vitesse, les contacts ne sont pas suffisamment ablis. De plus, les muscles se contractent avec une telle force, l'ils refusent d'obéir à la volonté, et qu'on ne peut plus lâcher les ignées. Avec un appareil bien construit et de grande dimension ne peut résister à la durée de la commotion; celui qui veut per-ter est renversé, se roule sur le sol et cède bientôt à la souffrance. Le maximum d'effet a lieu à l'instant où le plan des axes des bines est vertical, c'est-à-dire au moment où le magnétisme nge de sens dans le fer doux des bobines.

Avec l'appareil de Clarke, on fait produire aux courants d'in-ction tous les effets chimiques ou physiques des courants vol-ques. La figure 744 (page 819) montre comment on dispose périence pour la décomposition de l'eau. La lame *a* est alors primée, le courant se trouvant fermé par le liquide dans le-l se rendent les deux fils qui représentent les électrodes.

Pour les effets physiologiques et chimiques, le fil enroulé sur bobines est fin, et d'une longueur de 500 à 600 mètres sur cha-

cune. Pour les effets physiques, au contraire, le fil est gro
longueur de 25 à 30 mètres sur chaque bobine. Les figu
752 montrent la forme qu'on donne alors aux bobines e
mutateur. La première représente l'inflammation de l'ét

Fig. 751.

seconde l'incandescence d'un fil métallique *o*, dans leq
toujours dans le même sens, le courant allant de *a* à *c*.

* 883. **Machine magnéto-électrique de Nollet.** — Le p
l'appareil de Clarke a reçu une remarquable applicati
machine magnéto-électrique de Nollet. Cette machin
en un bâti de fonte de 1^{m},65 de hauteur; sur le con
bâti sont disposées parallèlement, sur des traverses
8 séries de 5 faisceaux aimantés puissants A, A, A... (
Ces faisceaux, qui peuvent porter chacun 70 kilogram
en fer à cheval et groupés de manière que, si on les
soit parallèlement à l'axe du bâti, soit dans un plan pe
laire à cet axe, ce sont toujours les pôles de noms cont
sont en regard. Dans chaque série, les faisceaux extr
composés de trois lames, tandis que les trois faisceaux
diaires sont à 6 lames, parce qu'ils agissent par leurs d
tandis que les premiers n'agissent que par une seule.

Sur un axe horizontal de fer, allant d'un bout à l'autr
sont quatre rouleaux de bronze, correspondant chacun
valles entre les faisceaux aimantés de deux séries vertic
que rouleau porte sur sa circonférence 16 bobines, c'e
autant qu'il y a de pôles magnétiques dans une série ver
faisceaux. Ces bobines, représentées dans la figure 755,
de celles de l'appareil de Clarke; en effet, elles ne sont
seul fil, mais à 12 fils, chacun de 10^{m},50, ce qui fait g
quantité et diminue la résistance. Les spires de ces bob
isolées par du bitume de Judée dissous dans de l'essence
benthine. Enfin, elles ne sont pas enroulées sur des cyli
fer pleins, mais sur des tubes de fer creux, fendus dans t
longueur, ce qui rend l'aimantation et la désaimantat
promptes quand les bobines passent devant les pôles des

es disques de cuivre qui terminent les bobines sont cou-
e sens de leur rayon, afin d'empêcher la production des

Fig. 753 ($h = 1^m,65$).

nduits dans ces disques (874). Les quatre rouleaux étant
pectivement de 16 bobines, cela donne en tout 64 bo-
posées en 16 séries horizontales de 4, comme on l'aper-
sur la gauche du bâti. La longueur des fils sur une bo-

la partie centrale de l'axe qui porte les rouleaux. D
sur la seconde face du rouleau, les mêmes fils vont s
lame figurée par un trait ponctué, qui les lie à la
de celle-ci ils sont conduits à la bobine *z* par une la
de suite pour les bobines *t*, *u*,..... jusqu'à la dernièr
de cette bobine aboutissent à une lame *n* qui trave
rouleau et va se souder aux fils de la première bobi
suivant, sur lequel se reproduit la même série de con
puis les fils se rendent au troisième rouleau, de ce
trième, et enfin à l'extrémité postérieure de l'axe.

Fig. 754. Fig. 7

En résumé, les bobines étant ainsi disposées à la
des autres, comme les éléments d'une pile montée
l'*électricité en tension*. Si on veut obtenir l'*électri*
tité, on fait communiquer alternativement les lam

ute. Pendant cette rotation, si l'on considère une bobine seule, es tubes de fer doux sur lesquels elle est enroulée, en passant ntre les pôles des aimants, subissent à leurs deux extrémités une aduction opposée, dont les effets s'ajoutent, mais changent d'un ôle au suivant; et comme ces tubes, pendant une révolution, assent successivement devant 16 pôles alternativement de noms ontraires, ils s'aimantent huit fois dans un sens et huit fois en ens contraire. Dans le même temps, il se produit donc dans la obine 8 courants induits directs et 8 courants induits inverses; n tout 16 courants par révolution. Avec la vitesse de 235 tours ar minute, le nombre des courants dans le même temps est de 35 fois 16, ou 3 760, alternativement de sens contraires. Le même ffet se produit dans chacune des 64 bobines; mais comme elles ont toutes enroulées dans le même sens et communiquent entre lles, leurs effets se superposent, et l'on n'a toujours que le même ombre de courants, seulement plus intenses.

Il reste à recueillir ces courants pour les utiliser à la production l'une lumière électrique intense. Pour cela, la dernière bobine x' u quatrième rouleau aboutit, par un fil G, à l'axe MN, qui porte es rouleaux (fig. 756); le courant est ainsi conduit sur l'axe et de

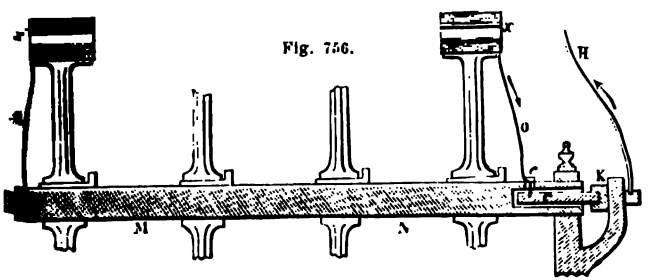


Fig. 756.

sur toute la machine, où l'on peut ensuite le recueillir en tel oint que l'on veut. Antérieurement, la première bobine x du prelier rouleau communique par un fil O, non plus à l'axe luième, mais à un cylindre d'acier c pénétrant dans l'axe dont il t isolé par un manchon d'ivoire. La vis e, qui reçoit le fil O, t elle-même isolée par un contact d'ivoire. Du cylindre c le cou-nt passe sur une pièce métallique K, qui est fixe, d'où il monte ffin dans le fil H, qui le conduit à la borne a de la figure 750. ant à la borne b, elle communique avec tout le bâti, et, par ite, avec le fil de la dernière bobine x' (fig. 756). Des deux rnes a et b, le courant est conduit par deux fils de cuivre à ux charbons dont la distance est réglée par un régulateur.

équivaut à celle de 150 lampes Carcel. Avec une
rouleaux, elle s'élève jusqu'à 200. Cette lumière
d'autre dépense que celle de deux chevaux-vap
tourner les rouleaux, quand ils sont au nombre d
tout utilisée pour l'éclairage des phares et pour cel
afin de prévenir les collisions pendant la nuit.

Une petite machine à un seul rouleau de 4 bobi
faire marcher une bobine de Ruhmkorff de moyen

* 884. **Bobine de Siemens.** — En 1854, Siemens
modifié la forme des bobines d'induction en enrou
plus dans un plan perpendiculaire à l'axe du noyau

Fig. 757.

les électro-aimants ordinaires, mais longitudinale
dire parallèlement à l'axe. La figure 757 donne un
tive de cette bobine, et la figure 759 ci-après en
partie centrale, une coupe transversale.

Le noyau, qui est de fer doux, a une longueur de
suivant la puissance qu'on veut donner à la bobin
longueur et à ses extrémités, il est entaillé d'une
profonde, dans laquelle s'enroule un grand nombre

extrémité. Il est formé de deux pièces d'acier, l'une isolée de l'axe, l'autre en contact avec lui. Un des bouts du fil de la bobine aboutit à la pièce isolée, l'autre à l'axe, et par suite à la seconde pièce du commutateur. Enfin, deux lames élastiques *d* et *e* (fig. 760), qui appuient alternativement sur chaque pièce du commutateur, transmettent des courants toujours de même sens.

Ces détails connus, si l'on faisait passer un courant dans le fil de la bobine, les segments A et B du noyau s'aimanteraient l'un dans un sens, l'autre dans l'autre, comme avec un électro-aimant ordinaire. Or, réciproquement, si la bobine est placée entre les pôles d'une série de barreaux aimantés, et qu'on lui imprime un mouvement de rotation rapide, les segments A et B s'aimantant et se désaimantant avec la même rapidité, leur induction développe dans le fil de la bobine des courants alternatifs, qui sont redressés par le commutateur et recueillis par les ressorts *d* et *e* (fig. 760). Siemens a, le premier, construit une machine magnéto-électrique d'après ce principe.

* 885. **Machine magnéto-électrique de Wilde.** — M. Wilde, ingénieur à Londres, a fait connaître, en 1865, une machine magnéto-électrique dans laquelle il utilise la bobine de Siemens, mais avec un principe nouveau, celui de la multiplication du courant. En effet, au lieu de recueillir immédiatement le courant engendré par l'induction des aimants, M. Wilde le fait passer dans un fort électro-aimant, et c'est ensuite par l'induction de celui-ci qu'il obtient un courant plus énergique.

La machine de Wilde se compose d'abord d'une batterie de 12 ou 16 aimants P (fig. 758) dont chacun pèse $1^k,500^{gr}$ et porte 10^k. Entre les pôles des aimants sont disposées longitudinalement deux armatures de fer doux C, C, séparées par une plaque de laiton O. Ces trois pièces sont réunies par des boulons, et l'armature totale ainsi formée est percée dans toute sa longueur d'une cavité cylindrique dans laquelle est une bobine de Siemens *n*, de 6 centimètres de diamètre. Le fil de cette bobine vient aboutir antérieurement à un commutateur qui conduit les courants positifs et négatifs à deux bornes *a* et *b*. Ce commutateur est représenté plus en grand dans la figure 760 ci-après. A l'autre extrémité de la bobine est une poulie qui reçoit, d'une courroie sans fin, une vitesse de rotation de 1 500 tours par minute. Le fil enroulé sur la bobine a 17 mètres de longueur.

Au-dessous du couronnement qui porte les aimants sont deux grandes bobines B, B. Chacune est composée d'une plaque rectangulaire de fer, de 91 centimètres de longueur sur 66 de largeur et 3 d'épaisseur, sur laquelle s'enroulent 500 mètres de fil de

cuivre isolé. D'un bout, les fils se réunissent de façon à former un circuit unique de 1 000 mètres; de l'autre, ils se rendent l'un

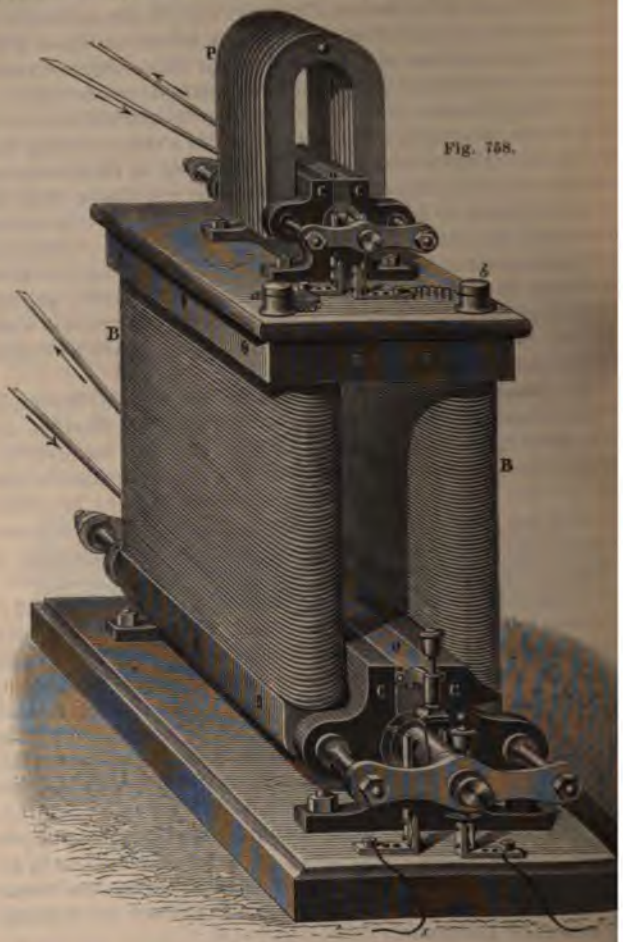


Fig. 758.

à la borne *a*, l'autre à la borne *b*. A leur partie supérieure, plaques des bobines sont reliées par une plaque transversale fer, de manière à former un électro-aimant unique.

A la partie inférieure des bobines B, B, sont deux armatures fer C, C, séparées par une plaque épaisse de laiton O, et, dans ute la longueur des armatures, une cavité cylindrique et une bo-ne de Siemens *m*, comme ci-dessus; mais ici la bobine a 1 mètre long, 18 centimètres de diamètre, et son fil est long de 30 mè-s. Ses bouts arrivent à un commutateur qui conduit les cou-nts redressés à deux fils *r* et *s*. La bobine *m* reçoit d'une cour-ie sans fin une vitesse de 1 700 tours par minute, et les bobines et *n* sont mues par une machine à vapeur de 3 chevaux.

La figure 759 montre, sur une plus grande échelle, une section

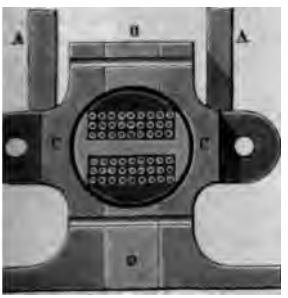


Fig. 759.

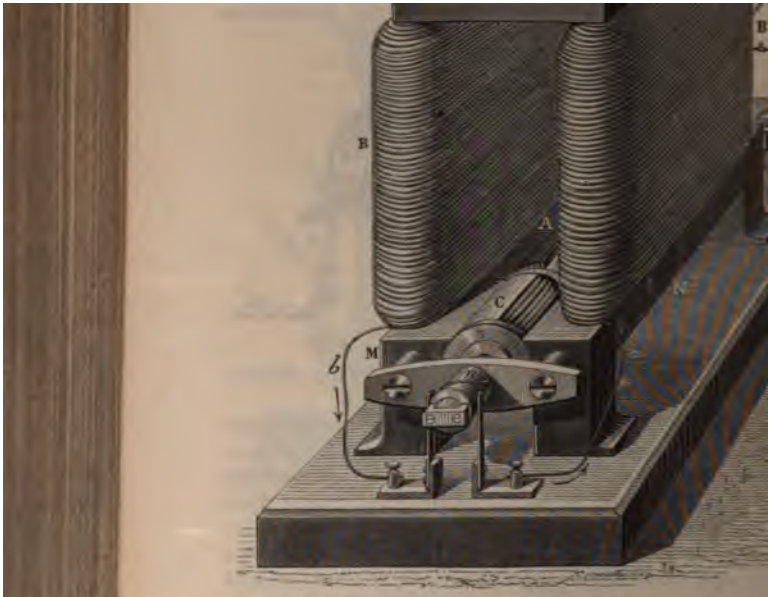
Fig. 760.

nsversale de la bobine *m*, des armatures C, C, et des plaques A, sur lesquelles s'enroule le fil des bobines B, B.

Ces détails connus, voici comment fonctionne la machine: lors-l'on imprime aux bobines *n* et *m* les vitesses indiquées ci-des-s, les aimants P font naître dans la première bobine des courants duits, qui, redressés par le commutateur, vont passer dans lectro-aimant B, B, et l'aimantent. Or, celui-ci aimantant les matures inférieures C, C, en sens contraires, l'induction de ces mières engendre dans la bobine *m* une série de courants positifs négatifs beaucoup plus puissants que ceux de la bobine supé-ure; en sorte qu'en les redressant par un commutateur et les ssant par les fils *r* et *s*, on obtient des effets très-intenses.

s effets sont encore augmentés si, comme l'a fait M. Wilde, ait passer le courant redressé de la bobine *m* dans un deuxième tro-aimant dont les armatures entourent une troisième bobine Siemens plus grande et tournant avec les deux autres. On ob-nt alors un courant qui fond un fil de fer de 30 centimètres de gueur et de 6 millimètres de diamètre.

886. **Machine dynamo-électrique de Ladd.** — Siemens et Wheatstone, en 1867, eurent en même temps l'idée des ma-



M. Ladd, à Londres, en 1867, a construit une machi
électrique à deux bobines de Siemens tournant entr

-même, déjà employée par M. Wheatstone, est la partie capi-
ɜ de la machine de Ladd.
ɜ et B' sont les bobines de l'électro-aimant reliées par une
que de fer K (fig. 761). Deux pièces de fer doux M et N en sont
armatures. Dans celles-ci est entaillée une cavité cylindrique
ıs laquelle tournent les bobines de Siemens C et A montées sur
même axe. La première est celle qui nourrit l'électro-aimant
· le commutateur *n* et les fils *a* et *b*. La seconde, qui a une lon-
ɜur double de la première, est celle dans laquelle se développe,
· l'induction de l'électro-aimant, le courant qu'on utilise pour
lumière électrique, ou pour tout autre effet. L'enroulement des
dans les deux bobines se fait dans deux plans rectangulaires.
fin, avant de faire marcher la machine, on fait passer dans le
de l'électro-aimant un courant, et les armatures M et N acquiè-
ıt ainsi un magnétisme rémanent qui suffit ensuite indéfiniment
ır la mise en train de la machine.
Les machines de Wilde et de Ladd présentent le grave incon-
ıient d'exiger des vitesses de rotation telles, qu'on ne peut les
ıe marcher d'une manière continue pendant plusieurs heures.
effet, les armatures s'échauffant par le développement répété
ı courants d'induction (900), leur magnétisme s'affaiblit et par
te l'intensité du courant. Pour corriger en partie cette cause
ffaiblissement, M. Ladd fait passer un courant d'eau froide dans
ce des bobines tournantes.
Quel que soit l'avenir de ces machines, elles sont une transfor-
tion remarquable du travail mécanique en électricité, en lu-
ère et en chaleur.

887. **Machine magnéto-électrique à courant continu de Gramme.** Les machines magnéto-électriques décrites ci-dessus présen-
ıt toutes le grave inconvénient de ne donner que des courants
ıtantanés, alternativement positifs et négatifs. On a vu que ces
ırants peuvent néanmoins être utilisés pour l'éclairage ; mais
ır les autres applications, comme l'argenture, la galvanoplas-
, il faut les *redresser;* c'est-à-dire les amener, à l'aide d'un
mmutateur, à être toujours de même sens. Or ce résultat ne
ıbtient qu'avec une perte notable d'électricité et avec des étin-
lles qui brûlent rapidement les armatures des commutateurs.
Ces inconvénients disparaissent dans une machine inventée ré-
mment par M. Gramme, à Paris, et construite dans les ateliers
M. Bréguet, à l'obligeance duquel nous devons le dessin ci-après
g. 762), fait à peu près au sixième. Sur une planchette est un
t faisceau aimanté entre les branches duquel passe un arbre
rizontal, qui reçoit un mouvement de rotation rapide à l'aide

d'une corde sans fin K et d'une poulie P. Sur l'arbre, dans le plan des branches de l'aimant, est monté un fort anneau de fer doux, sur lequel sont enroulées parallèlement à l'axe 35 bobines d'un fil de cuivre recouvert de soie et d'un enduit isolant, faisant 300 tours par bobine. Dans chacune, le fil se replie en dedans de l'anneau pour venir se souder à une pièce de laiton isolée ; puis de là retourne s'enrouler de nouveau sur l'anneau pour former une seconde bobine. De celle-ci il va encore se souder à une pièce de

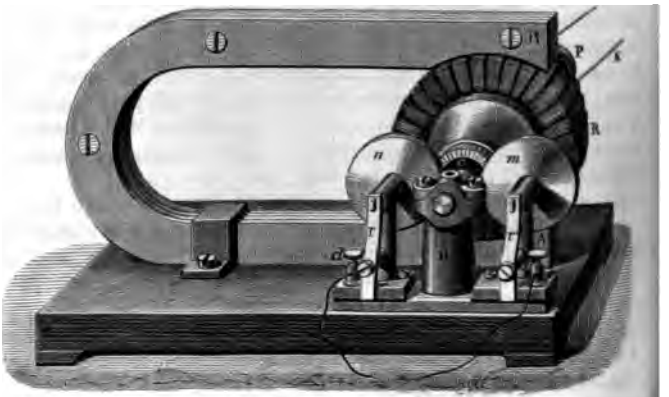


Fig. 762 (h=23).

laiton pareille à la première, et ainsi de suite de manière à former un conducteur sans fin, divisé en 35 bobines identiques.

Toutes les pièces de laiton soudées au fil de cuivre sont isolées de l'appareil et viennent former un faisceau en *c* autour de l'axe. Là, sur un même diamètre horizontal de l'anneau, une partie de ces pièces est en contact à droite et à gauche avec deux frotteurs de laiton *m* et *n*, vus en projection horizontale dans la figure 763, qui fait voir en dessus les bobines et leurs accessoires. Les frotteurs *m* et *n* peuvent glisser dans le sens de l'axe sur leurs supports, et deux ressorts, *r*, *r'*, les pressent contre les pièces *c*.

Ces détails connus, supposons que l'anneau et ses bobines tournent de gauche à droite : en passant sous le pôle B du faisceau, la partie supérieure de l'anneau prend une polarisation contraire à celle de ce pôle, et son aimantation développe un courant inverse des courants d'Ampère (840) dans les bobines qui approchent du pôle B, et directe dans celles qui s'en éloignent (871). Par conséquent, si le courant qui naît à droite, vers la région

R du système, est positif, celui qui se développe dans opposée est négatif.

le pôle A, un effet semblable se produit; mais ici la le A étant contraire à celle de B, c'est le courant de bas en s R qui est positif, et le courant à gauche qui est négatif. umé, on a donc constamment deux courants positifs par- bobines supérieures et inférieures vers la région moyenne x courants négatifs dirigés vers la région opposée. De là nts se rendent aux pièces ondantes, où ils sont re- par les frotteurs *m* et *n*, ansmettent à deux bornes l y a donc courant continu rs de même sens, *m* étant ositif, et *n* le pôle négatif. ation a lieu en sens con- s pôles sont renversés. nachine, quoique de petite n, 23 centimètres de hau- fit pour décomposer l'eau porter au rouge un fil de) centimètres de long et llimètre de diamètre. Sa e augmente avec la vitesse n jusqu'à la limite de 700

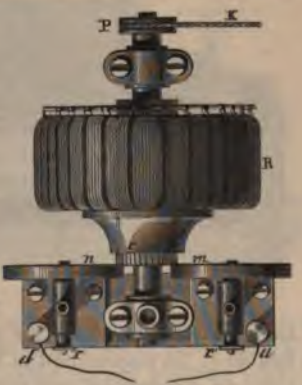


Fig. 763.

rs par minute; et ses effets varient suivant que le fil des est gros et court, ou fin et long. Dans le premier cas, on ets de quantité; dans le second, des effets de tension.

obine d'induction de Ruhmkorff. — Ruhmkorff a construit première fois, en 1851, des bobines à deux fils, de très- dimensions, à l'aide desquelles on parvient à faire pro- x courants d'induction, avec six à huit éléments de Bun- effets physiques, chimiques et physiologiques équiva- même supérieurs à ceux qu'on obtient avec les machines es et les batteries les plus puissantes.

mensions de ces bobines sont variables; les plus grandes mkorff ait construites jusqu'ici ont 65 centimètres de long diamètre. Toutes sont formées de deux fils : un gros, de illimètres de diamètre, et un fin, d'un quart ou d'un millimètre. Ces fils, qui sont de cuivre rouge, sont non- nt recouverts de soie, mais chaque spire est isolée de la par une couche de gomme laque fondue (fig. 764). C'est il qui est le fil inducteur, c'est-à-dire dans lequel passe

le courant de la pile; sa longueur est de 40 à 50 mètres. C'est lui qui est enroulé le premier sur un cylindre creux de bois ou de carton, qui forme le noyau de la bobine. Le tout est renfermé dans un manchon de verre ou de caoutchouc isolant, et c'est sur cette enveloppe qu'on enroule le fil fin, qui est le fil induit, et dont la longueur varie avec les dimensions des bobines. Dans les grandes, le fil fin a jusqu'à 120 000 mètres de long; son diamètre est

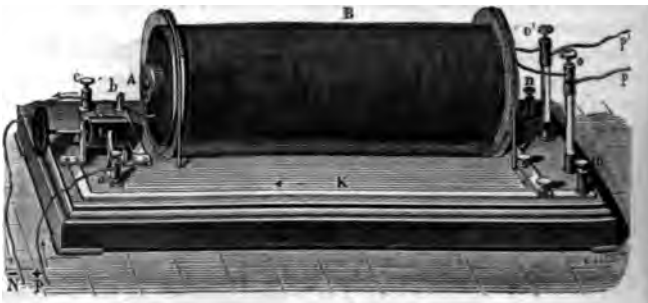


Fig. 764.

alors moindre que dans les petites bobines : $\frac{1}{5}$ de millimètre au lieu de $\frac{1}{3}$. En augmentant la longueur du fil fin, on gagne en tension; en augmentant son diamètre, on gagne en quantité. Pour faire marcher les petites bobines de 30 à 35 centimètres de longueur, il faut trois ou quatre éléments de Bunsen, grand modèle; pour les grandes bobines, Ruhmkorff estime qu'on doit adopter une surface de pile quatre fois plus grande que pour les petites.

Interrupteur à marteau. — Ces détails connus, voici comment marche l'appareil. Le courant de la pile, arrivant par le fil P à une borne *a* (fig. 764), gagne de là le commutateur C, qui sera décrit ci-après; puis la borne *b*, d'où il entre enfin dans la bobine. Là, il parcourt le gros fil, où il agit par induction sur le fil fin. C'est ensuite à l'autre bout de la bobine, par le fil *s* (fig. 765), que le courant sort pour gagner l'interrupteur. En suivant la direction des flèches, on voit que le courant monte dans la borne *i*, gagne une pièce de fer oscillante *o*, qu'on appelle le *marteau*, descend par l'*enclume h*, et gagne une plaque de cuivre rouge K, qui le ramène au commutateur C (fig. 764). De là il se rend à la borne *c*, et enfin au pôle négatif de la pile par le fil N.

Or on sait (869) que le courant qui passe dans le gros fil n'agit par induction sur le fil fin que lorsqu'il commence ou qu'il finit. Il faut donc que ce courant soit constamment interrompu. C'est

au moyen du marteau oscillant *o* (fig. 765) que ces interruptions s'obtiennent. En effet, au centre de la bobine, d'un bout à l'autre, est un faisceau de gros fils de fer doux, formant par leur ensemble un cylindre un peu plus long que la bobine, comme on le voit en A, aux deux extrémités. Ce faisceau s'aimantant dès que le courant de la pile passe dans le gros fil, le marteau *o* est attiré; mais aussitôt, le contact n'ayant plus lieu entre *o* et *h*, le courant se trouve interrompu, l'aimantation cesse et le marteau retombe; puis le courant passant de nouveau, la même série de phénomènes recommence; en sorte que le marteau se met à osciller avec une grande rapidité, ce qui produit les interruptions du courant. A mesure que le courant de la pile passe ainsi, par intermittences,

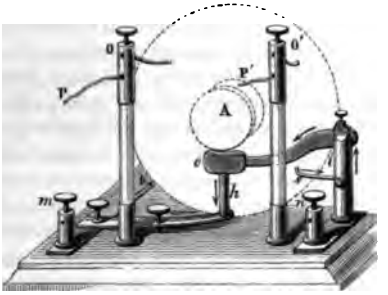


Fig. 765.

dans le gros fil de la bobine, à chaque interruption un courant d'induction, successivement direct et inverse, se produit dans le fil fin. On a vu ci-dessus que ces courants ont d'autant plus de tension, que la bobine présente plus de résistance, et que, quoiqu'ils contiennent des quantités égales d'électricité, le courant direct l'emporte toujours en tension sur le courant inverse (877).

Par suite, si l'on met en contact les bouts P, P' du fil fin (fig. 764), des quantités égales et contraires d'électricité circulant dans le fil, les deux courants tendent à s'annuler. En effet, si l'on place un galvanomètre dans le circuit, on ne remarque qu'une déviation extrêmement faible dans le sens du courant direct. Il n'en est plus de même si l'on écarte les deux extrémités P, P', du fil. La résistance de l'air s'opposant au passage des courants, c'est celui qui a le plus de tension, c'est-à-dire le courant direct, qui passe en excès, et plus l'intervalle de P à P' augmente, plus le courant direct tend à passer seul, jusqu'à une limite où ni le courant inverse ni le courant direct ne passent. Il y a seulement alors en P et en P' des tensions alternativement de sens contraires.

Condensateur. — M. Fizeau a encore augmenté cette tension en interposant un condensateur dans le circuit inducteur. Ce condensateur se compose, dans les grandes bobines, de 150 feuilles d'étain d'un demi-mètre carré de surface, ce qui donne une surface totale de 75 mètres carrés. Ces feuilles, par leur réunion,

forment des armatures collées sur les deux faces d'une bande de taffetas gommé qui les isole; puis elles sont repliées plusieurs fois sur elles-mêmes, de manière que le tout puisse se placer en dessous de la bobine, dans le socle de bois qui la supporte. L'armature positive est en communication avec la borne *i*, qui reçoit le courant à sa sortie de la bobine, et l'autre, la négative, est en communication avec la borne *m*, qui communique elle-même par la lame K avec le commutateur C et avec la pile.

Pour comprendre l'effet du condensateur, observons qu'à chaque interruption du courant inducteur, il se produit un extra-courant de même sens que lui (876), lequel, le continuant en quelque sorte, prolonge sa durée, et, par suite, affaiblit la tension. C'est à cet extra-courant qu'est due l'étincelle qui éclate à chaque interruption entre le marteau et l'enclume, étincelle qui, lorsque le courant est fort, altère rapidement les surfaces de contact du marteau et de l'enclume, quoiqu'on ait soin que ces surfaces soient de platine. Au contraire, par l'interposition du condensateur dans le courant inducteur, l'extra-courant, au lieu de jaillir en étincelles aussi fortes, s'élance dans le condensateur, l'électricité positive sur l'armature qui communique avec *i*, et la négative sur l'armature qui communique avec *m*. Or les électricités contraires des deux armatures, se recombinant aussitôt par le gros fil, par la pile et par le circuit CK*m*, donnent naissance à un courant contraire à celui de la pile, lequel désaimante instantanément le faisceau de fer doux; le courant induit est donc d'une plus courte durée (895), et par suite plus intense. Les bornes *m* et *n* placées à l'extrémité de la planchette servent à recueillir l'extra-courant.

Commutateur. — Le commutateur, représenté en coupe horizontale dans la figure 766, est tout de cuivre, sauf le noyau central A, qui est un cylindre de buis; sur les deux côtés sont fixés deux contacts de cuivre C, C'. Sur ceux-ci s'appuient deux lames élastiques de laiton, liées aux deux bornes *a* et *c*, qui reçoivent les électrodes de la pile. Le courant de celle-ci arrivant en *a*, monte en C; de là, par une vis *y*, gagne la borne *b* et la bobine; puis, revenant par la lame K, qui communique avec le marteau, le courant va jusqu'en C' par la vis *x*, descend en *c* et retourne à la pile par le fil N. Si à l'aide du bouton *m* on tourne le commutateur de 180 degrés, il est facile de voir que c'est l'inverse qui a

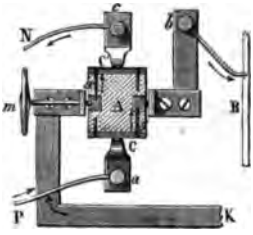


Fig. 766.

ı; le courant gagne alors le marteau par la lame K et sort en *b*. ìn, si l'on ne tourne que de 90 degrés, les lames élastiques s'appuient plus sur les contacts C C', mais sur le cylindre de s A, et le courant est interrompu.

.es deux fils qu'on voit sortir de la bobine en o, o' (fig. 765), t les deux bouts du fil fin. Ils sont en communication avec deux plus gros P, P', qui servent à recueillir le courant induit et à liriger où l'on veut. Enfin, ajoutons qu'avec de fortes bobines terrupteur à marteau oscillant représenté dans la figure 765 insuffisant, les surfaces de contact s'échauffant jusqu'à se der. Foucault a inventé un interrupteur à mercure qui ne sente pas cet inconvénient, et qui est un important perfec- ınement à la bobine de Ruhmkorff.

89. **Effets de la bobine de Ruhmkorff.**—Ces effets, comme ceux batteries et des piles, se divisent en effets *physiologiques*, *orifiques*, *chimiques*, *lumineux* et *mécaniques*, mais avec e différence qu'ils sont beaucoup plus intenses.

ffets physiologiques. — Ils sont tellement intenses, que les ımotions que donnent les bobines moyennes, quand le gros st parcouru par le courant d'un seul couple de Bunsen, sont ı insupportables. Avec deux couples de Bunsen on tue un la-, et avec un nombre de couples peu considérable un homme ıit foudroyé.

ffets calorifiques.— Pour les constater, on interpose entre les rémités P et P' du fil induit (fig. 764) un fil de fer très-fin : ce- -ci est fondu et brûle avec une vive lumière. Si l'on termine cun des fils P et P' par un fil de fer très-fin, lorsqu'on appro- les deux fils de fer l'un de l'autre, il n'y a que celui qui cor- pond au pôle négatif qui se fonde ; ce qui montre que la ten- ı est plus grande au pôle négatif qu'au pôle positif.

ffets chimiques, effluve électrique. — Ces effets varient sui- t qu'on les obtient par l'é- elle, ou par le nouveau pro- é que M. du Moncel a fait naître, en 1853, sous le nom *fluve électrique*, et à l'aide uel des résultats très-re- rquables ont été récemment enus.

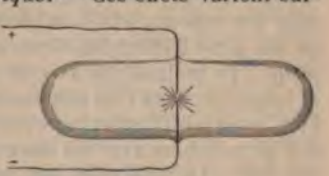


Fig. 767.

M. Ed. Becquerel et Fremy ont constaté que, si l'on fait pas- le courant de la bobine de Ruhmkorff dans un tube de verre in d'air et hermétiquement fermé (fig. 767), l'azote et l'oxy- e de l'air se combinent en donnant naissance à de l'acide ni-

treux. Mais les effets chimiques de l'étincelle présentent l'inconvénient d'être compliqués d'effets calorifiques et mécaniques; ceux-ci disparaissent dans l'effluve électrique, qu'on obtient par la disposition suivante.

On fixe, l'une en face de l'autre, à la distance de 2 à 3 millimètres, deux feuilles de verre à vitre, recouvertes extérieurement chacune d'une feuille d'étain, de manière à former un condensateur (716) dont les armatures sont séparées par une double feuille de verre et par la couche d'air interposée, laquelle doit être parfaitement desséchée. Mettant les deux feuilles d'étain respectivement en communication avec les pôles du courant induit de la bobine de Ruhmkorff, un flux lumineux, bleuâtre, remplit tout l'espace compris entre les deux feuilles de verre : c'est l'*effluve électrique*.

M. du Moncel explique ce phénomène en admettant que, sous l'influence de la condensation, les molécules du verre et de l'air interposé se polarisent à la manière des molécules liquides dans l'électrolyse (783), et conduisent ainsi la décharge d'une face à l'autre des feuilles de verre.

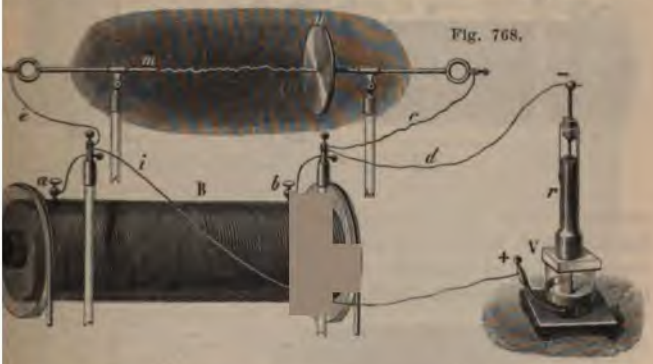
M. Jean a fait voir que, soumis à l'effluve électrique, l'acide carbonique se dédouble en oxygène ozoné et en oxyde de carbone.

MM. Thénard, père et fils, en expérimentant sur un mélange de 3 trois volumes d'hydrogène et 1 d'azote, ont obtenu, après un effluve de deux heures, une production d'ammoniaque assez abondante pour être sensible à l'odorat. De plus, d'après les mêmes savants, non-seulement la réaction par l'effluve, entre l'hydrogène et l'oxyde de carbone, et celle entre l'acide carbonique et le protocarbure d'hydrogène sont d'ordre organique, mais d'ordre organique très-avancé.

Effets lumineux. — Ces effets sont très-variés, suivant qu'ils ont lieu à la pression ordinaire, ou dans des gaz très-raréfiés, ou dans des vapeurs à très-faible tension. Dans l'air, ils consistent en une série d'étincelles vives et bruyantes, dont la longueur va jusqu'à 45 centimètres avec la grande bobine de 65 centimètres de longueur; dans l'air très-raréfié, les effets sont fort remarquables. Pour faire l'expérience, on fait communiquer les deux fils P et P' de la bobine avec les deux tiges de l'œuf électrique déjà décrit (727). Le vide étant fait dans le globe, à un ou deux millimètres au moins, on voit une belle traînée lumineuse se produire d'une boule à l'autre, d'une manière sensiblement continue et avec la même intensité que celle qu'on obtient avec une puissante machine électrique dont on tourne rapidement le plateau (fig. 774, page 844). La figure 772 représente la déviation par influence que

ıbit la lumière électrique quand on approche la main de l'œuf. C'est le pôle positif du courant induit qui présente le plus d'éclat; ı lumière est rouge de feu, tandis que celle du pôle négatif est ible et violacée; de plus, cette dernière se prolonge tout le long la tige négative, phénomène qui ne se produit pas au pôle positif.

Effets mécaniques.— La bobine de Ruhmkorff produit des effets écaniques si puissants, qu'avec le grand appareil de 65 centiètres on perce une masse de verre de 5 centimètres d'épaisseur. 'expérience est alors disposée comme le montre la figure 768.



es deux pôles du courant induit correspondant aux boutons *a* t *b*, on fait communiquer par un fil de cuivre *i* le bouton *a* avec conducteur inférieur d'un perce-verre analogue à celui déjà écrit (fig. 620), puis le pôle *b* par le fil *d* avec le conducteur suérieur. Celui-ci est isolé dans un gros tube de verre *r* rempli de omme laque qu'on y a coulée à l'état de fusion. Entre les deux onducteurs est la plaque de verre à percer V. Dans le cas où elle-ci présenterait une trop grande résistance, il est à craindre ue l'étincelle n'éclate dans la bobine même en trouant la couche olante qui sépare les fils, et alors la bobine serait mise hors usage. Pour éviter cet accident, deux fils *e* et *c* mettent les bles de la bobine en communication avec deux tiges métalliques orizontales, plus ou moins espacées l'une de l'autre. Alors si étincelle ne peut trouer le verre, elle éclate de *m* en *n*, et la bone est préservée.

Charge des batteries. — La bobine de Ruhmkorff peut aussi re appliquée à charger des bouteilles de Leyde, et même des tteries de plusieurs jarres. La figure 769 fait voir comment on spose l'expérience avec la bouteille. Les armatures de celle-ci

sont respectivement en communication avec les pôles de la bobine par les fils *d* et *i*, tandis que ces mêmes pôles communiquent par les fils *e* et *c* avec deux tiges horizontales d'un excitateur

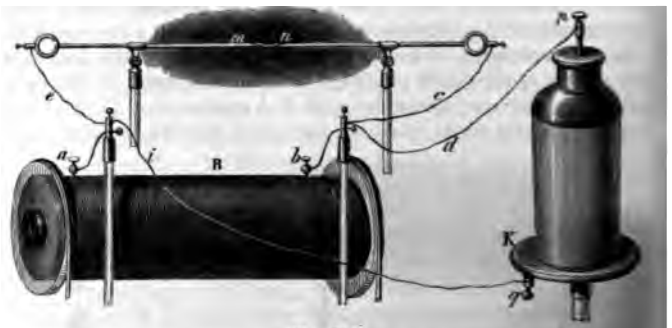


Fig. 769.

universel (page 666). La bouteille se chargeant constamment par les fils *i* et *d*, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, elle se décharge au fur et à mesure par les fils *e* et *c*, la décharge ayant lieu de *m* en *n* sous la forme d'une étincelle de 6 centimètres de

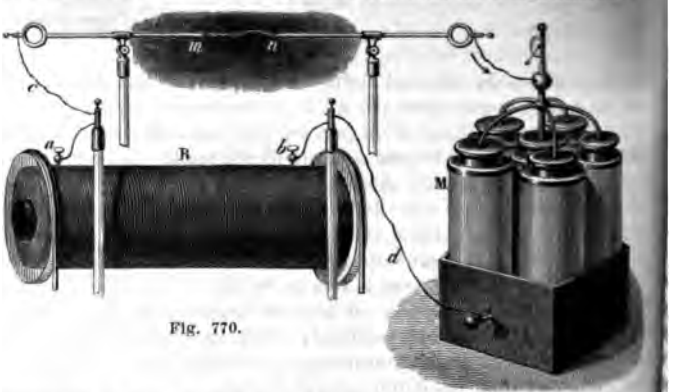


Fig. 770.

longueur, très-éclatante et d'un bruit assourdissant; car ce ne sont plus là des étincelles comparables à celles des machines électriques, mais plutôt à des coups de foudre.

Pour la charge de la batterie, l'expérience est disposée autrement, l'armature extérieure étant en communication avec un des pôles de la bobine par le fil *d* (fig. 770), et l'armature intérieure

tre, par les tiges *m*, *n*, et par le fil *c*. Toutefois les tiges
e sont pas en contact. Si elles l'étaient, les deux courants
t direct passant également, la batterie ne se chargerait
lis qu'à cause de l'intervalle entre *m* et *n*, le courant di-
l'ouverture, qui a plus de tension, passe seul, et c'est lui
e la batterie. Avec la grande bobine, une batterie de 6
e 30 décimètres carrés d'armature chacune, se charge
i dire instantanément.

xpérience de Hittorf. — On a vu (691) que la question
si l'électricité se propage dans le vide absolu a été dé-
puis longtemps entre les physiciens. On admet généra-

Fig. 771.

ujourd'hui, d'après les expériences de Masson en 1851, et
celles de M. Grove, puis de M. Gassiot, que la présence
ieu pondérable est nécessaire à la propagation de l'élec-
Iittorf a confirmé cette opinion au moyen de la bobine
korff. Il soude aux extrémités d'un petit tube de verre
de platine, dont les bouts, à l'intérieur, ne sont distants
demi-millimètre; puis il fait dans le tube le vide le plus
ossible, soit par l'absorption de l'acide carbonique, soit
ndensation de la vapeur de soufre, soit par d'autres pro-
ettant ensuite les deux fils de platine en communication
deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff de 25 à 30 centi-
e longueur, il fait communiquer les mêmes pôles avec
mités d'un tube de verre de 3 mètres de longueur, dans
vide a été fait à deux millimètres (fig. 771). Or, lors-
t marcher la bobine, l'étincelle n'éclate pas entre les deux
atine du petit tube; mais une longue traînée lumineuse

apparaît d'un bout à l'autre du grand, ce qui fait voir la grande résistance que le vide présente au passage de l'électricité, et encore n'est-ce sans doute pas le vide absolu. En effet, avec une bobine plus forte l'étincelle éclate entre les fils de platine, ce qui, du reste, peut avoir pour cause la vaporisation du métal. On ne peut donc pas dire, jusqu'ici, que la non-conductibilité du vide soit absolue, puisque des tubes qu'on regarde comme vides résistent à une certaine étincelle, mais en laissent passer une plus forte.

Les recherches sur la non-conductibilité du vide ont conduit à ce fait que les gaz qui conduisent mal l'électricité à la pression ordinaire, la conduisent mal encore si elle est trop faible, et qu'il y a un degré de raréfaction pour lequel la conductibilité est maximum. Pour l'hydrogène, de tous les gaz le meilleur conducteur, ce maximum a lieu à une pression voisine de 2 millimètres.

* 891. **Stratification de la lumière électrique.** — En étudiant la

Fig. 772. Fig. 773. Fig. 774.

lumière électrique que donne la bobine de Ruhmkorff, M. Quet a observé que si l'on ne fait le vide dans l'œuf électrique qu'après

y avoir introduit de la vapeur d'essence de térébenthine ou d'esprit de bois, d'alcool, de sulfure de carbone, etc., l'aspect de la lumière est complétement modifié. Elle apparaît alors sous la forme de zones alternativement brillantes et obscures, formant comme une pile de lumière électrique entre les deux pôles (fig. 773).

Dans cette expérience, il résulte de la discontinuité du courant d'induction que la lumière n'est pas continue, mais consiste en une suite de décharges d'autant plus rapprochées, que le marteau *o* (fig. 765) oscille plus rapidement. Les zones lumineuses paraissent alors animées d'un double mouvement giratoire et ondulatoire rapide. M. Quet regarde ce mouvement comme une illusion d'optique, se fondant sur ce que, si l'on fait osciller lentement le marteau avec la main, les zones apparaissent très-nettes et fixes.

M. de la Rive pense que la stratification de la lumière électrique est un phénomène analogue à la production des ondes sonores; c'est-à-dire un phénomène mécanique provenant d'une succession d'impulsions isochrones, exercées par les décharges successives sur la colonne gazeuse raréfiée.

La lumière du pôle positif est plus souvent rouge, et celle du pôle négatif violette. Toutefois la teinte varie avec la vapeur ou le gaz qui se trouve dans le globe.

Despretz a observé que les phénomènes constatés par Ruhmkorff et par M. Quet avec un courant discontinu se reproduisent avec un courant continu, mais avec cette différence, que le courant continu exige un nombre de couples de Bunsen assez considérable, tandis que le courant discontinu de la bobine de Ruhmkorff n'en exige qu'un petit nombre. C'est même un fait constaté par l'expérience, que l'intensité des effets lumineux de cette bobine augmente peu quand on multiplie le nombre des couples de la pile.

*892. **Tubes de Geissler.**— C'est surtout lorsqu'on fait passer la décharge de la bobine dans des tubes de verre contenant une vapeur ou un gaz très-raréfiés, que la stratification de la lumière électrique présente un éclat remarquable. Ces phénomènes, qui ont été étudiés par Masson, Grove, Gassiot, Plücker, etc., se produisent dans des tubes fermés, de verre ou de cristal, construits pour la première fois par Geissler. On y introduit un gaz ou une vapeur; puis, avant de les fermer, on y fait le vide à un demi-millimètre au moyen d'une machine pneumatique à mercure (186). Enfin, aux deux extrémités des tubes sont soudés deux fils de platine qui y pénètrent de 1 à 2 centimètres.

Aussitôt qu'on fait communiquer ces fils avec les pôles de la bobine de Ruhmkorff, il se produit, dans toute la longueur du tube, de magnifiques stries brillantes, séparées par des bandes obscures.

Ces stries varient de forme, de couleur et d'éclat avec le degré de vide, la nature du gaz ou de la vapeur, et les dimensions des tubes. Souvent le phénomène prend encore un plus bel aspect par la fluorescence que la décharge électrique excite dans le verre (612).

La figure 775 représente les stries données par l'hydrogène, à

Fig. 775.

un demi-millimètre de pression, dans un tube alternativement renflé et étroit; dans les boules, la lumière est blanche; dans les parties capillaires, elle est rouge.

La figure 776 montre les stries dans l'acide carbonique à un quart de millimètre de pression; la couleur est verdâtre, et les stries n'ont pas la même forme que dans l'hydrogène. Dans l'azote, la lumière est jaune rouge.

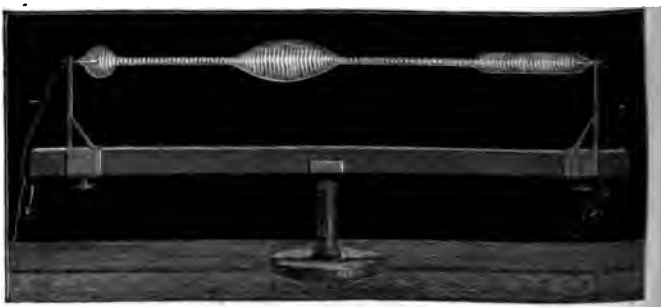


Fig. 776.

Plücker, qui a étudié la lumière des tubes de Geissler, a trouvé qu'elle ne dépend pas de la substance des électrodes, mais de la nature du gaz ou de la vapeur qui est dans le tube. Il a constaté aussi que les lumières fournies par l'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, etc., diffèrent beaucoup, quant au spectre qu'elles fournissent, quand on les fait passer au travers d'un prisme.

A l'aide d'un puissant électro-aimant, Plücker a soumis la décharge électrique, dans les tubes de Geissler, à l'action du magnétisme, comme Davy l'avait fait pour l'arc voltaïque. Ne pouvant

écrire ici toutes les expériences de ce savant, nous mentionn
ons seulement, dans le cas où la décharge est perpendiculaire
ligne des pôles, la séparation de cette décharge en deux par
es distinctes, phénomène qui peut s'expliquer par l'action oppo
e de l'électro-aimant sur les deux extra-courants d'ouverture e
fermeture qui se trouvent dans la décharge.

*893. **Application des tubes de Geissler.**— On a fait l'application
s tubes de Geissler à la pathologie. Un
ng tube capillaire étant soudé à deux
oules munies de fils de platine, on re-
urbe ce tube en son milieu de manière
e les deux branches se touchent, et l'on
roule leur extrémité en spires serrées,
mme on le voit en *a* (fig. 777).
Le tube ainsi préparé contenant, comme
ux décrits ci-dessus, un gaz très-raré-
, aussitôt que la décharge passe, il se
oduit en *a* une lumière assez vive pour
lairer les fosses nasales, la gorge ou
ute autre cavité du corps humain où
n introduit le tube.

Fig. 777.

* 894. **Fusée de Stateham.**— M. Stateham, ingénieur anglais, a
uvé qu'un fil de cuivre AB (fig. 778) étant recouvert de gutta-
rcha sulfurée, au bout de quelques mois il se forme, au contact
métal et de son enveloppe, une couche de sulfure de cuivre qui

Fig. 778.

B

pour conduire le courant. En effet, si, en une partie quel-
e du circuit, on coupe la moitié supérieure de l'enveloppe,
ue, dans l'échancrure *ab* ainsi formée, on enlève un morceau
e cuivre de 6 millimètres de longueur, un courant intense
se dans le fil de cuivre se trouve interrompu de *a* en *b*,
passe alors par le sulfure de cuivre, qu'il fait entrer en
. D'où il résulte que si, dans la cavité ainsi creusée, on
orps inflammable, comme du coton-poudre, ou de la poudre
ce corps prend feu : de là le nom de *fusée de Stateham*.
veut faire marcher la fusée de Stateham avec une pile,

895. **Comparaison des courants induits inverse et direc** montre que les deux courants induits inverse et direct *sont é* **Matteucci l'a constaté en les faisant passer simultanément da troiyte : l'action électrolysante est alors nulle.**

Il ne faudrait pas en conclure que les deux courants inve égaux en durée et en tension : le courant direct a moins de du sion. En effet, lorsqu'on ferme le courant inducteur, on a vu immédiatement son état permanent, c'est-à-dire uniforme, n état variable plus ou moins prolongé (819). Or, quelle que s état variable, et, par suite, de l'action induisante, il passe da la même quantité d'électricité, celle nécessaire pour atteindre Par conséquent, quelle que soit la durée de l'induction, l'act tale sur le fil induit est constante. Il n'en est pas de même de l' du courant induit; car l'électricité mise en mouvement dans ce tant moindre, dans un temps donné, que l'induction est plus drait, pour que le courant inverse et le courant direct fusse sité, que l'induction commençante et l'induction finissante durée; or on va voir qu'il n'en est pas ainsi, à cause de l'acti extra-courants de fermeture et d'ouverture.

Pour cela, soit une bobine à deux fils, un gros dans lequel d'une pile, et un fin soumis à l'induction. Il y a en réalité, trois sortes de courants dont les effets s'influencent : dans le inducteur, dans le fil fin le courant induit, inverse ou direct courant de fermeture ou d'ouverture, qui prend naissance d même temps que le courant induit dans le fil fin. Cela posé, fermeture, étant de sens contraire à celui du courant inducteu la durée de l'état variable de ce courant, et affaiblit ainsi l' du courant inverse dans le fil fin. Mais, à la rupture du circui d'ouverture, de même sens que le courant inducteur, le renfor

La quantité d'électricité mise en mouvement dans les courants induits, et inverse, est la même; mais l'intensité du premier est toujours beaucoup grande que celle du dernier.

L'intensité d'un courant induit est proportionnelle à celle du courant inducteur.

Cette même intensité est proportionnelle au produit des longueurs des circuits inducteur et induit.

L'action induisante entre deux éléments des fils inducteur et induit est en raison inverse de la simple distance.

7. Propriétés des courants induits. — Malgré leur instantanéité, les courants induits possèdent toutes les propriétés des courants voltaïques. Comme eux, ils exercent des effets physiologiques violents, produisent des effets lumineux, calorifiques, chimiques, et donnent eux-mêmes naissance à de nouveaux courants induits. Enfin, ils font dévier l'aiguille des galvanomètres et aimantent des barreaux d'acier, quand on les fait passer dans un fil de cuivre enroulé autour de ces barreaux.

Toutefois le courant direct et le courant inverse, par suite de leur inégale durée, offrent des effets très-différents : étant égaux en quantité, ils produisent les mêmes effets sur le galvanomètre et sur le voltamètre, qui sont des appareils qui mesurent la quantité; mais pour les effets de tension, c'est-à-dire lorsqu'il y a de grandes résistances à vaincre, le courant direct l'emporte de beaucoup sur le courant inverse; par exemple, quand le courant a à vaincre la résistance de l'air pour donner des étincelles, ou la force coercitive de l'acier pour aimanter des barreaux, ou la résistance du corps humain pour donner des commotions.

8. Direction des courants induits sur les disques tournants. — Faraday

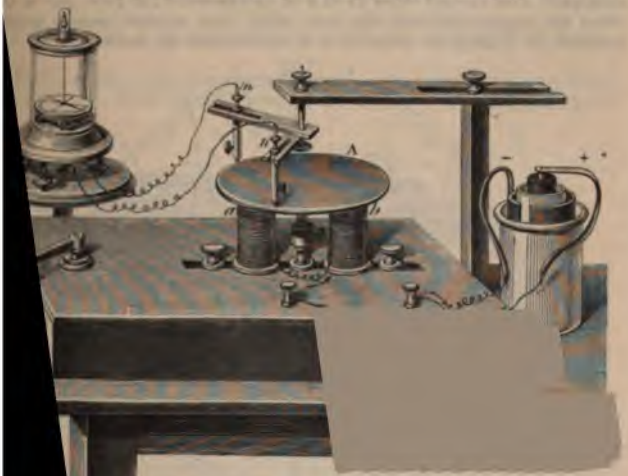


Fig. 779.

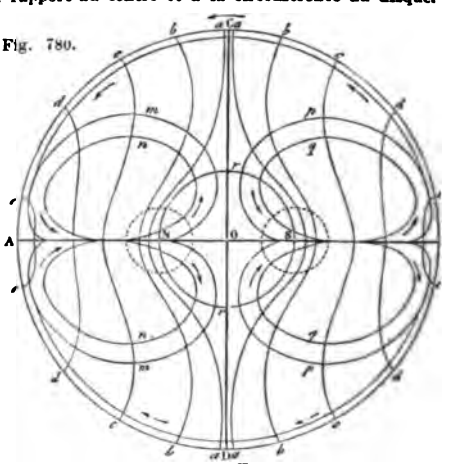
elle était la direction des courants induits sur la surface des disques tournant devant les pôles contraires de deux forts aimants. Son procédé a mettre l'un des bouts du fil du galvanomètre en contact avec

l'axe du disque tournant, et l'autre bout avec la circonférence du
Il a ainsi constaté, d'après la déviation de l'aiguille du galvanom
dant la rotation du disque, il se produit à sa surface des coura
rigés du centre à la circonférence, ou de la circonférence au c
sens de la rotation, et que ces courants sont symétriques par r
mètre polaire, c'est-à-dire qui passe au-dessus des pôles des aimar

Nobili et Antinori se sont aussi occupés de rechercher la dir
rants induits sur les disques tournants, et, pour cela, l'un des l
galvanomètre étant en contact avec l'axe du disque, ils faisaient
l'autre bout non-seulement avec la circonférence du disque, m
les différents points de sa surface. Ils ont ainsi observé que, sur
disque entrant sous l'influence magnétique, il se développe consta
tème de courants contraires à ceux de l'aimant, et que, sur les p
geant de la même influence, il se produit des courants de même
de l'aimant, et par suite contraires aux premiers.

Matteucci, ayant étudié les mêmes phénomènes avec plus de p
trouvés plus compliqués qu'on ne le pensait. L'appareil de ce ph
pose d'une caisse de bois dans laquelle une suite d'engrenages t
l'aide d'une manivelle M, un mouvement de rotation plus ou moi
disque de métal A, de 20 centimètres de diamètre (fig. 779). Au-
que, à un intervalle de 2 à 3 millimètres, est un puissant élect
qui se déplace dans une rainure, de manière à pouvoir présentes
cessivement à tous les points du disque. Enfin, au-dessus du di
tiges de cuivre *m* et *n*, terminées chacune par une pointe émous
mée, qui touche le disque. Ces mêmes tiges, à leur extrémité su
muniquent avec les deux bouts du fil d'un galvanomètre; de plus
sition des supports auxquels elles sont fixées, elles peuvent occ
positions par rapport au centre et à la circonférence du disque.

Fig. 780.



Au moyen de cet appareil, et en mettant l'un des bouts du fi
mètre en contact avec le centre, et l'autre avec les différents point
du disque, Matteucci a constaté les faits suivants, représentés sur

ns laquelle les points N et S sont les projections des pôles de l'électro-aimant, AB la droite qui passe au-dessus de ces pôles :

1° Matteucci a trouvé des *lignes de nul courant*, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, qui sont normaà la ligne AB, et se contournent près des bords du disque, de manière à les per toujours normalement.

2° La projection de chaque pôle de l'électro-aimant sur le disque est un *point* tre, c'est-à-dire de nul courant; de plus, une ligne neutre *rr* sensiblement cirire, qui passe par les projections des deux pôles et a pour centre l'axe de tion du disque, est en même temps *ligne d'inversion*, c'est-à-dire que les couts en dedans et en dehors de cette ligne sont de directions contraires.

3° Les *lignes de courants électriques*, c'est-à-dire celles suivant lesquelles a le maximum d'effet, coupent toujours normalement les lignes de nul courant sont tangentes à la droite AB; les lignes de courant maximum sont représées en *m*, *n*, *p*, *q*.

4° La position de la ligne neutre *rSrN*, qui passe par les projections des deux s, n'est pas sensiblement modifiée par la nature du disque, par son épaisseur ar l'intensité du courant de la pile; mais cette ligne se resserre sur elleue à mesure que la vitesse de rotation augmente.

5° Enfin, de chaque côté des points neutres, sur le diamètre polaire, on trouve points *maxima* dont la distance dépend de la grosseur de l'électro-aimant et diamètre du disque tournant.

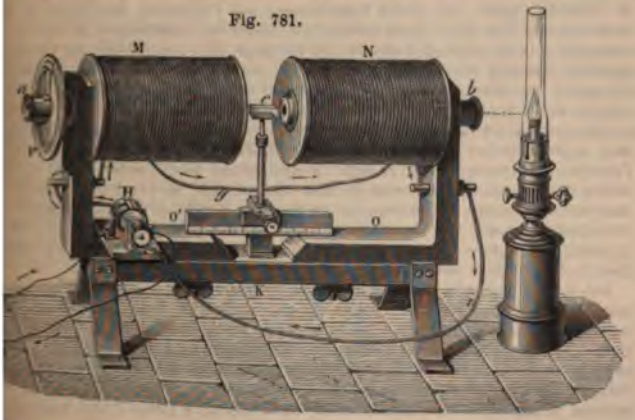
---

* CHAPITRE XIII

EFFETS DES AIMANTS PUISSANTS, DIAMAGNÉTISME

99. **Effets optiques des aimants puissants.** — Le premier effet des électroants puissants, découvert par Faraday, en 1845, est l'action qu'ils exercent

Fig. 781.



usieurs substances transparentes; action telle, que lorsqu'un rayon polarisé rse ces substances dans la direction de la ligne des pôles magnétiques, le

Ces prismes étant placés de manière que leurs sections pr
pendiculaires entre elles, le prisme *a* éteint complétement la
au travers du prisme *b*. Si alors on place en *c*, sur l'axe des
plaque à faces parallèles, de flint ou de verre, la lumière est
que le courant ne passe pas; or, aussitôt que les communica
la lumière reparaît, mais colorée, et si l'on tourne l'analys
gauche, selon la direction du courant, la lumière passe par l
du spectre, ainsi qu'il arrive avec les quartz taillés perpendi
(631). M. Ed. Becquerel a fait voir qu'un grand nombre de s
liquides peuvent ainsi faire tourner le plan de polarisation, s
mants puissants. Faraday admet que, dans ces expériences,
de polarisation est due à une action des aimants sur les ray
vant Biot et M. Ed. Becquerel, ce phénomène est dû à une ac
les corps transparents soumis à leur influence, hypothèse g

900. **Chaleur développée par l'induction des aimants**
corps en mouvement. — On a vu, en parlant de l'expérie
qu'un disque de cuivre rouge, tournant sur lui-même, agit à
mant mobile pour lui communiquer son mouvement de rota
tôt (904) que réciproquement un cube de cuivre rouge, anim
de rotation rapide, est arrêté brusquement par l'influence
forts aimants (fig. 788). Il est évident que, dans ces expérie
s'opposer à la rotation de l'aiguille, ou forcer le cube à cont
faudrait dépenser constamment un certain travail mécaniq
résistance qui résulte de l'action inductrice des aimants. C
théorie de la transformation du travail mécanique en cha
quelle serait ainsi la quantité de chaleur développée par la
tion sous l'influence d'aimants puissants. M. Joule, dans le
l'équivalent mécanique de la chaleur, a enroulé une bobine a
de fer doux, et ayant renfermé le tout dans un tube de ver
imprimé au système un mouvement de rotation rapide entre
fort électro-aimant. Un thermomètre placé dans le liquide a
quantité de chaleur dégagée par les courants d'induction d

elle a pris, avec les roues et le disque, un mouvement de rotation rapide
andonne à elle-même, la rotation continue assez longtemps en vertu d
sse acquise. Mais lorsqu'on fait passer le courant, le disque et les autres pi
rêtent presque instantanément, et si alors on reprend la manivelle, on épro
résistance considérable, due à la réaction sur l'électro-aimant des cours
uits développés dans le disque pendant le mouvement. Or si, malgré ce
stance, on continue à tourner, c'est ici que la force qu'on dépense se tra
me en chaleur, le disque s'échauffant rapidement. Dans une expérience fai

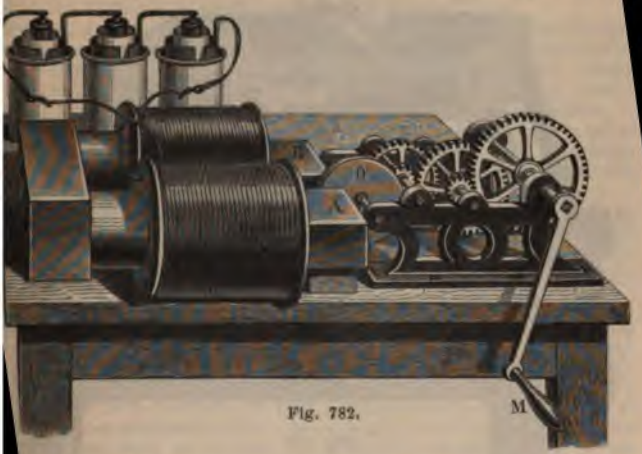


Fig. 782.

i nous par Foucault, la température du disque s'est élevée, en trois mi-
, de 10 degrés à 61, le courant étant fourni seulement par trois éléments
nsen. Avec six, la résistance est telle, qu'on ne pourrait tourner longtemps.

Machine à induction péripolaire de Le Roux. — M. Le Roux vient
connaître une machine d'induction magnéto-électrique très-remarquable,
ue l'induction s'y produit sans variation de distance ou d'intensité de
ant, tandis que dans les appareils connus jusqu'ici, l'induction se déve-
ujours par une de ces deux causes (871).

machine, qui a beaucoup de rapport avec celle ci-dessus de Foucault,
se de quatre bobines magnétiques A, A', B, B', disposées horizontale-
. 783). Les noyaux de fer doux des bobines A et B sont reliés par une
fer doux a, a, et ceux des bobines A', B', par une pièce semblable; en
les pièces a, a, les noyaux des bobines et les armatures fixées à leurs
forment un châssis rectangulaire complet de fer doux.

ans de ce châssis, sur les faces internes des pièces a, a, sont deux
fer doux m et n, de cinq centimètres d'épaisseur environ, formés
oitiés égales; l'inférieure ne fait qu'un avec les pièces a, a', comme
a figure 785, qui donne une coupe verticale des deux disques suivant
i joint leurs centres; mais la moitié supérieure (fig. 784) est seule-
posée à a, a', et peut s'enlever à volonté, sur chaque côté du

disques m et n est un disque de cuivre rouge d, de 15 centimètres
et de 2 millimètres d'épaisseur. Le disque d, aussi rapproché que

possible des disques m, n, est monté sur un axe horizontal qui traverse les pièces a, a', et reçoit d'une manivelle M, à l'aide d'un système d'engrenages, une vitesse de rotation de 180 tours par seconde au maximum.

Le courant d'une pile de six Bunsen, grand modèle, arrive à un commutateur de Ruhmkorff, gagne la bobine A, puis les bobines A', B' et B, d'où il

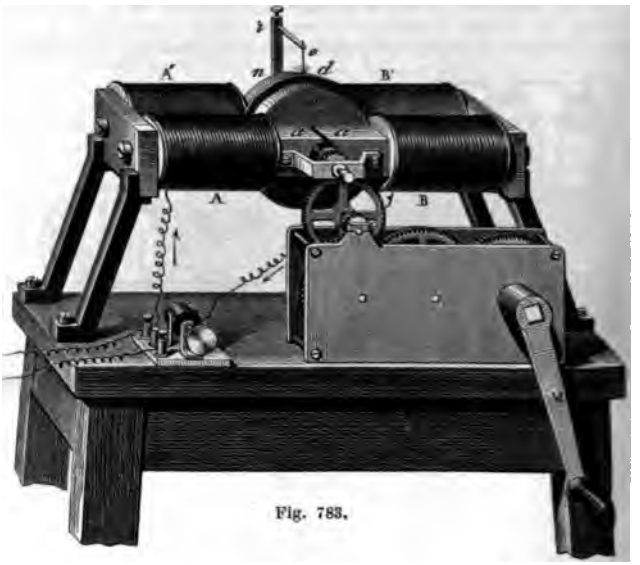


Fig. 783.

revient au commutateur et à la pile. Enfin l'enroulement sur les bobines A et B a lieu de façon que, les pôles en présence étant de même nom, il se forme sur le milieu de a a un pôle unique, sud par exemple; et sur le milieu de la pièce correspondante, de l'autre côté de n, un pôle nord; en sorte que c'est sur la

Fig. 784.

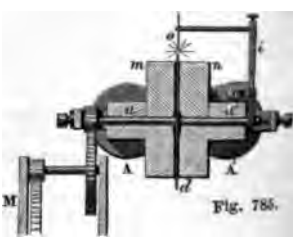


Fig. 785.

ligne des centres des disques m et n que se trouvent les deux pôles magnétiques qui résultent du système des quatre bobines.

Ces détails connus, si l'on enlève d'abord les moitiés mobiles des disques m et n, on revient tout à fait au cas de l'expérience de Foucault (fig. 783), où le disque de cuivre ne plonge qu'à moitié dans l'induction magnétique; en effet,

ussitôt qu'on fait passer le courant, il se produit une résistance telle, qu'on e peut plus tourner la manivelle.

Au contraire, et c'est là l'effet remarquable de l'appareil de M. Le Roux, si on remet en place les deux demi-disques m et n, de manière à expérimenter omme le montre la figure 783, toute résistance disparaît, et l'on tourne la anivelle avec la même facilité que lorsque le courant ne passait pas. Cependant il y a encore induction, mais la force inductrice agit alors tout entière du entre à la circonférence, et il n'y a de courant qu'autant qu'on fait communiquer la circonférence du disque avec sa partie centrale.

En effet, si l'on met en communication l'axe de rotation avec la circonfénce du disque de cuivre rouge par un conducteur i et un fil d'aluminium o, ui sert de frotteur (fig. 783 et 785), de vives étincelles jaillissent au contact u fil et du disque d, ce qui prouve l'existence d'un courant intense, dont la irection change avec le sens de la rotation et avec la polarité des bobines.

M. Le Roux donne le nom d'*induction péripolaire* à cette induction qui se roduit sans variation de distance ni d'intensité de l'induisant, mais par le mouement seul d'un corps qui tourne autour d'un axe passant par les deux pôles 'un fort électro-aimant.

902. **Action rotatoire des aimants sur les jets électriques dans les milieux rès-raréfiés.** — On doit à M. de la Rive une expérience qui démontre l'action otatoire des aimants sur les courants induits. Ce savant a d'abord fait cette xpérience avec une forte machine électrique; mais elle présente un éclat bien ius intense avec la bobine de Ruhmkorff.

L'appareil de M. de la Rive se compose d'un ballon de verre, ou œuf électrique, muni à l'une de ses extrémités de deux robinets, l'un qui se visse sur la achine pneumatique, et l'autre, qui est un robinet semblable à celui de Gay-ussac (372), sert à introduire quelques gouttes d'un liquide volatil dans le balm. A la partie inférieure de celui-ci est mastiquée une tubulure dans laquelle asse une tige de fer doux $m\,n$, de deux centimètres de diamètre (fig. 786), et ont l'extrémité supérieure aboutit à peu près au centre du ballon. Cette tige est ecouverte dans toute son étendue, sauf à ses deux extrémités, d'une couche olante très-épaisse, formée d'abord de gomme laque, puis d'un tube de verre ecouvert lui-même de gomme laque, encore d'un second tube de verre, et enfin 'une couche de cire bien lisse. Cette couche isolante doit avoir au moins un centimètre d'épaisseur. Dans l'intérieur du ballon, la couche isolante est entourée, n x, d'un anneau de cuivre qui communique avec un bouton extérieur c.

Ayant fait le vide le plus parfait possible dans le ballon, on y introduit uelques gouttes d'éther ou d'essence de térébenthine, au moyen du robinet a, puis n fait le vide de nouveau, de manière qu'il ne reste dans le ballon qu'une vaeur extrêmement raréfiée. Posant alors, sur l'une des branches d'un fort électroimant AB, un disque épais de fer doux o muni d'un bouton, on applique sur ce isque l'extrémité m de la tige $m\,n$; puis on fait arriver les deux bouts du fil duit de la bobine de Ruhmkorff, l'un au bouton c, l'autre au bouton o. Or si l'on it alors marcher la bobine sans que l'électro-aimant fonctionne, les électricités ontraires des fils s et r passant, celle du premier fil jusqu'à l'extrémité supéeure n de la tige de fer doux, et celle du second fil à l'anneau x, une gerbe ximineuse plus ou moins régulière apparaît à l'intérieur du ballon de n en x, xat autour de la tige, comme dans l'expérience de l'œuf électrique.

Mais si l'on fait passer un courant dans l'électro-aimant, aussitôt le phénoène change : au lieu de partir des différents points du contour supérieur n et l'anneau x, la lumière se condense et jaillit en un seul arc lumineux de n x. De plus, cet arc tourne assez lentement autour du cylindre aimanté mn, xtôt dans un sens, tantôt dans un autre, selon la direction du courant induit Le sens de l'aimantation. Dès que l'aimantation cesse, le phénomène lumineux levient ce qu'il était auparavant.

Cette expérience a été imaginée par M. de la Rive pour expliquer, par fluence du magnétisme terrestre, une sorte de mouvement rotatoire de l' à l'est, en passant par le sud, qu'on observe dans les aurores boréales. En

la rotation de l'arc lumineux, dans l'expérience ci-dessus, doit évidemm rapporter à la rotation des courants par les aimants (832).

DIAMAGNÉTISME

903. Substances diamagnétiques et substances paramagnétiques. — déjà vu (652) que les aimants agissent réellement sur toutes les substance attraction sur les unes, et par répulsion sur les autres. Ces effets, qui l d'abord attribués à la présence de quantités infiniment petites de fer da substances sur lesquelles on expérimentait, ne furent nettement établis qu Faraday, en 1847, à l'aide d'électro-aimants très-puissants.

Ce savant a appelé *diamagnétiques* les corps repoussés, et *paramagnéti* ou simplement *magnétiques*, ceux qui sont attirés; et comme il expérim avec des électro-aimants, il a donné le nom de *direction axiale* à cell coïncide avec la droite qui joint les deux pôles de l'électro-aimant, et cel *direction équatoriale* à celle qui est perpendiculaire à la même ligne. Le

ant a reconnu que le nombre des substances diamagnétiques est beaucoup plus nd que celui des substances magnétiques.

Les substances diamagnétiques sont le bismuth, le plomb, l'antimoine, le zinc, uivre, le cristal de roche, le verre, le sel marin, le plâtre, le charbon, le fre, et en général les substances organiques, comme les résines, le sucre, le , la chair des animaux. Les substances magnétiques sont le fer, le nickel, le alt, le chrome, et la plupart des métaux. On peut admettre aujourd'hui qu'il st pas une seule substance sur laquelle n'agissent, dans un sens ou dans itre, les aimants très-puissants.

904. **Effets diamagnétiques des aimants puissants.** — Les effets diamagnéques des aimants ne se manifestent qu'autant que ceux-ci sont très-puissants, c'est avec l'appareil de Faraday (fig. 781) qu'ils ont été découverts et étudiés. rencontre des substances diamagnétiques également dans les solides, dans les uides et dans les gaz, ainsi que le démontrent les expériences suivantes, pour

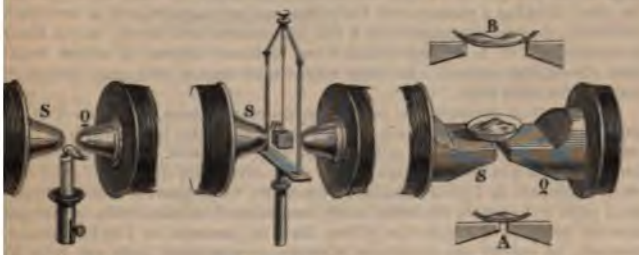


Fig. 787. Fig. 788. Fig. 789.

quelles on visse, sur les bobines, des armatures de fer doux S et Q de formes erses (fig. 787 et 789).

1° *Diamagnétisme des solides.* — Un petit cube de cuivre rouge étant suspendu tre les deux aimants par un fil de soie tordu, et tournant rapidement sur lui-me par l'effet du fil qui se détord (fig 788), à l'instant où le courant passe ns les bobines, le cube s'arrête dans la position où il se trouve. Si l'on donne a pièce mobile la forme d'une petite barre rectangulaire, elle se met en croix ec l'axe des bobines, ou se dirige suivant cet axe, selon qu'elle est formée d'une bstance diamagnétique, comme le bismuth, l'antimoine, ou bien d'une subnce magnétique, comme le fer, le nickel, le cobalt. Ces phénomènes ont été servés par Faraday, qui les explique par les courants d'induction que les élec-aimants font naître dans les corps mobiles à l'instant où l'on fait passer le rant dans les deux bobines.

2° *Diamagnétisme des liquides.* — Les liquides présentent aussi les phénones de magnétisme et de diamagnétisme. Pour en faire l'observation, on en nplit de petits tubes de verre très-minces qu'on suspend à la place du cube *m* ns la figure 788. Si les liquides sont magnétiques, comme les dissolutions de fer, nickel, de cobalt, les tubes se dirigent dans le sens de l'axe des deux électro-mants; mais s'ils sont diamagnétiques, comme l'eau, l'alcool, l'éther, l'essence térébenthine et la plupart des dissolutions salines, les tubes se placent dans e direction perpendiculaire à l'axe des aimants.

L'action des aimants puissants sur les liquides magnétiques ou diamagnétiques bserve encore au moyen de l'expérience suivante, faite pour la première fois r Plücker. On verse une dissolution de chlorure de fer dans un verre de montre, l'on pose celui-ci sur les deux armatures S et Q des électro-aimants de l'ap-reil de Faraday. Aussitôt que le courant passe dans les électro-aimants, on

voit la dissolution former, selon l'intervalle des bobines, un ou deux renflements, comme on l'a représenté en A et en B (fig. 789); ces renflements persistent tant que passe le courant, et se produisent, à des degrés différents, avec tous les liquides magnétiques. Les liquides diamagnétiques présentent des effets inverses, ainsi que l'a constaté Plücker pour le mercure, en observant sa courbure sur une pièce d'argent fraîchement amalgamée et posée sur les armatures.

3° *Diamagnétisme des gaz.* — Bancalari a observé, le premier, que la flamme d'une bougie placée entre les deux bobines de l'appareil de Faraday en est fortement repoussée (fig. 787). Toutes les flammes présentent, à des degrés différents, le même phénomène. M. Quet a obtenu des effets de répulsion extrêmement intenses en soumettant à la même expérience la lumière électrique de la pile obtenue avec les deux cônes de charbon de la figure 645.

Depuis l'expérience de Bancalari, Faraday et M. Ed. Becquerel ont fait de nombreuses recherches sur le diamagnétisme des gaz, ainsi que nous l'avons déjà dit en parlant de l'action des aimants puissants sur tous les corps (652). De plus, Faraday a reconnu que l'oxygène, qui est magnétique à la température ordinaire, devient diamagnétique à une température très-élevée, et que souvent le magnétisme ou le diamagnétisme d'une substance dépend du milieu dans lequel elle est. Par exemple, un corps magnétique dans le vide peut devenir diamagnétique dans l'air.

4° *Détonation produits par la rupture du courant sous l'influence d'un puissant électro-aimant.* — Nous citerons encore, comme effet remarquable de l'appareil de Faraday, l'expérience suivante, due à M. de la Rive. Lorsqu'on place entre les deux pôles S et Q de la figure 787 les deux extrémités du gros fil dans lequel passe le courant de l'électro-aimant, c'est-à-dire en fermant le courant entre les deux pôles S et Q, cette fermeture a lieu sans étincelle et sans bruit, ou seulement avec un bruit et une étincelle faibles. Mais au moment où l'on interrompt le courant, on entend une détonation violente, presque aussi forte que celle d'un coup de pistolet. Ce que l'on peut expliquer par l'extra-courant dont l'intensité est puissamment accrue par l'influence des deux pôles de l'électro-aimant.

905. **Théorie du diamagnétisme.** — Plusieurs théories ont été proposées pour donner l'explication des phénomènes diamagnétiques. Faraday a admis que lorsqu'un barreau de bismuth, par exemple, est placé entre les deux pôles d'un fort électro-aimant, chaque pôle de celui-ci fait naître dans l'extrémité la plus voisine du barreau un pôle de même nom; en sorte que la cause du diamagnétisme ne serait autre qu'une polarité contraire à la polarité magnétique, hypothèse qui est en opposition avec la théorie du magnétisme.

M. Ed. Becquerel admet que la répulsion exercée par les aimants sur certaines substances est due à ce qu'elles sont entourées par un milieu plus magnétique qu'elles, ce qui est évidemment une application du principe d'Archimède, et ce qui suppose que l'éther est magnétique, hypothèse qui n'a rien de contradictoire avec la théorie des aimants.

MÉTÉOROLOGIE

ET

CLIMATOLOGIE

MÉTÉOROLOGIE

06. **Objet de la météorologie.**— On nomme *météores* les phénomènes i se produisent dans l'atmosphère, et *météorologie* la partie de la ysique qui a pour objet l'étude des météores.

On distingue des météores *aériens*, qui sont les vents, les ouragans es trombes; des météores *aqueux*, qui comprennent les nuages, les nuillards, la pluie, la rosée, le serein, la neige, la grêle; et les mé- res *lumineux*, comme la foudre, les aurores boréales, l'arc-en-ciel.

Météores aériens.

07. **Direction et vitesse des vents.** — Les *vents* sont des courants iens qui se manifestent dans l'atmosphère suivant des directions et c des vitesses très-variables. Quoiqu'ils soufflent dans toutes les ctions, on en distingue huit principales, qui sont le *nord*, le *nord-* l'*est*, le *sud-est*, le *sud*, le *sud-ouest*, l'*ouest* et le *nord-ouest*. Les ins partagent en outre les intervalles entre ces 8 directions en 4, ce fait en tout 32 directions, qu'on désigne respectivement sous le nom *umbs*. Le tracé de ces 32 rumbs sur un cercle, en forme d'étoile, connu sous le nom de *rose des vents*.

a direction du vent se détermine à l'aide de girouettes; quant à sa sse, elle se mesure au moyen de l'*anémomètre*. On nomme ainsi un moulinet à ailettes que le vent fait tourner; du nombre de tours en un temps donné on déduit la vitesse. Dans nos climats, la vi- e moyenne est de 5 à 6 mètres par seconde. Avec une vitesse de 2 res, le vent est modéré; avec dix mètres, il est frais; avec 20 mètres, il ort; de 25 à 30 mètres, il y a tempête; et de 30 à 40 mètres, ouragan.

8. **Cause des vents.** — Les vents ont pour cause une rupture d'é- bre dans quelque partie de l'atmosphère, rupture qui résulte tou- s d'une différence de température entre les pays voisins. Par exemple, température du sol s'élève sur une certaine étendue, l'air en con- avec lui s'échauffe, se dilate et monte vers les hautes régions de osphère, où il s'écoule en produisant des vents qui soufflent des rées chaudes vers les contrées froides. De plus, l'équilibre se trou-

gions équatoriales, soufflant du nord-est au sud-ouest boréal, et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisph gnent, des deux côtés de l'équateur, jusqu'à 30 deg

Les vents alizés ont pour cause l'échauffement l'orient vers l'occident par la rotation de la terre échauffement, l'air des régions équatoriales, s'élevant est remplacé par de l'air plus dense arrivant des chaque hémisphère, deux courants de sens contraire dirigé de l'équateur vers le pôle, et occupant les l'atmosphère; l'autre, d'air froid, dirigé du pôle occupant les régions inférieures, à cause de sa plus la terre était immobile, ces courants avanceraient e vant un méridien; mais il n'en peut être ainsi à cau la terre de l'occident vers l'orient. En effet, l'atmos ce mouvement, à mesure que le courant parti du sud, il pénètre dans des couches d'air animées d'u tion plus grande que la sienne; il avance donc ver tement que les couches qu'il traverse. Par suite l'ouest d'autant plus, qu'il approche davantage de un vent soufflant du nord-est. En résumé, le cou d'abord du nord, puis du nord-est, et enfin de l'e deux hémisphères, l'origine des vents alizés.

Dans les hautes régions de l'atmosphère, un ph se produit, mais en sens contraire : le courant pa avançant vers le nord, va toujours, à cause de sa en s'inclinant vers l'est, et tend à se transformer vent d'ouest, de sud qu'il est d'abord.

Dans la zone torride, ces deux courants restent

Chine. Ces vents sont dirigés vers les continents dans l'été, et contraire dans l'hiver.

ioussons ont pour cause une déviation régulière des vents alizés e par l'échauffement de la zone torride en Afrique : ils sont dus à de l'immense colonne d'air chaud qui s'élève de ce continent omme d'une immense cheminée, à l'époque des deux équinoxes. *noun* est un vent brûlant qui souffle des déserts de l'Asie et de e, et qui est caractérisé par sa haute température et par les ju'il élève dans l'atmosphère et transporte avec lui. Quand ce iffle, l'air s'obscurcit, la peau se dessèche, la respiration s'ac- et la soif devient ardente.

nt est connu sous le nom de *sirocco* en Italie et à Alger, où il u grand désert de Sahara. Il porte le nom de *khamsin* en Égypte, fait sentir depuis la fin d'avril jusqu'en juin. Pour se préserver s d'une transpiration cutanée trop rapide occasionnée par ce s indigènes de l'Afrique s'enduisent le corps de graisse.

ise est un vent qui souffle sur les côtes, de la mer vers la terre, et de la terre vers la mer, la nuit ; c'est-à-dire de la région la ide vers la région la plus chaude. En effet, le sol s'échauffant e la mer pendant le jour, l'air, dilaté sur le continent plus que ier, s'élève et est remplacé par un courant d'air plus dense, de la mer vers la terre. La nuit, le sol se refroidissant plus que la mer par le rayonnement, le même phénomène se reproduit contraire. La brise de mer commence après le lever du soleil, te jusqu'à trois heures de l'après-midi, décroît jusqu'au soir, et re en brise de terre après le coucher du soleil. Les brises de mer re ne se font sentir qu'à de faibles distances des côtes. Les brises ulières entre les tropiques, le sont moins dans nos contrées, et peine sensibles sur les côtes du Groënland. Le voisinage des nes donne aussi naissance à des brises périodiques diurnes.

vents variables sont des vents qui soufflent tantôt dans une di- tantôt dans une autre, sans qu'on puisse constater aucune loi ide à leur direction. Dans les latitudes moyennes, la direction s est très-variable ; en avançant vers les pôles, cette irrégularité te, et, sous la zone glaciale, les vents soufflent parfois de plu- oints de l'horizon. Au contraire, en approchant de la zone tor- deviennent de plus en plus réguliers. C'est le vent du sud-ouest ine dans le nord de la France, en Angleterre et en Allemagne ; midi de la France, la direction des vents incline davantage vers en Espagne et en Italie, c'est le vent du nord qui prédomine.

oi de Dove sur la rotation des vents. — Malgré la grande irrégu- ie présente la direction des vents dans nos climats, on a pu con- ie cette direction est, en général, animée d'un mouvement gira- ns le sens du mouvement apparent du soleil ; c'est-à-dire que, s variations, *elle tourne avec lui, par périodes plus ou moins , de l'est au sud, à l'ouest et au nord dans l'hémisphère boréal, ement dans l'hémisphère austral, pour revenir progressive- point de départ.*

d'une rotation complète des vents, on remarque que
le baromètre, partant du point le plus bas, s'élève et
ment à son point de départ ; ce qui fait voir que les
métriques sont liées aux courants aériens (152).

Météores aqueux.

911. Nuages. — Les *nuages* sont des amas de vapeu
gouttelettes d'une petitesse extrême, à une hauteur
grande dans l'atmosphère. Ils résultent toujours de la
vapeurs qui s'élèvent de la terre. D'après les apparence
tent, on divise les nuages en quatre espèces principa
cirrus, les *cumulus*, les *stratus* et les *nimbus*. Ces
nuages sont représentées dans la figure 790, et désig
ment par 4, 3, 2 et 1 oiseau au vol.

Les *cirrus* sont de petits nuages blanchâtres, offrant
ments déliés, assez semblables à de la laine cardée. Ce
les plus élevés, et, vu la basse température des régions
on les regarde comme formés de particules glacées
neige. Leur apparition précède souvent un changemen

Les *cumulus* sont des nuages arrondis, présentant l
tagnes entassées les unes sur les autres. Ils sont plus
qu'en hiver, et, après s'être formés le matin, ils se dis
ment le soir. Si, au contraire, ils deviennent alors plu
surtout s'ils sont surmontés de cirrus, on doit s'atten
ou à des orages.

Les *stratus* sont des couches nuageuses horizontales
continues, qui se forment au coucher du soleil et dis

r, observa au-dessus de lui des cirrus qui paraissaient être à une
ur considérable. M. d'Abbadie a observé, en Éthiopie, des nuages
ux dont la hauteur n'était que de 212 mètres au-dessus du sol.
ur expliquer la suspension des nuages dans l'atmosphère, Halley
sa, le premier, l'hypothèse des vapeurs vésiculaires, dans laquelle

Fig. 790.

ppose que les nuages sont formés d'une infinité de vésicules ex-
ment petites, creuses comme des bulles de savon, et remplies d'un
us chaud que l'air ambiant par un effet d'absorption de la cha-
olaire; en sorte que ces vésicules flotteraient dans l'air comme
t de petits ballons. Cette théorie, soutenue par de Saussure, puis
ratzenstein, par M. Bravais et par le plus grand nombre des phy-
s, a été longtemps universellement enseignée; mais combattue
rd par Désaguliers, puis par Monge, elle compte aujourd'hui
mbreux contradicteurs. Ceux-ci admettent que les nuages et les
llards sont formés de gouttelettes d'eau extrêmement petites, pleines
tant dans l'atmosphère, où elles sont soutenues par les courants d'air
l ascendants, de même que les poussières légères sont élevées par
nts. Quant à l'immobilité que présentent les nuages dans le sens
verticale, elle ne serait qu'apparente, selon ces physiciens. Le plus
nt les nuages tombent lentement; mais alors leur partie inférieure
sipe continuellement dans les couches plus chaudes qu'elle tra-
, tandis que leur partie supérieure s'accroît sans cesse par l'ad-

dition de nouvelles vapeurs qui se condensent; ce qui explique comment ils paraissent conserver une hauteur constante.

912. **Formation des nuages.** — Plusieurs causes contribuent à la formation des nuages. 1° La basse température des hautes régions de l'atmosphère. En effet, il se dégage constamment de la terre et des eaux, sous l'influence du soleil, des vapeurs qui s'élèvent dans l'air en vertu de leur force élastique et de leur moindre densité; ces vapeurs, rencontrant des couches d'air de plus en plus froides, descendent bientôt à la température de saturation, et c'est alors que, se condensant en gouttelettes infiniment petites, elles donnent naissance aux nuages.

2° Les courants d'air chaud et humide, qui s'élèvent pendant le jour dans l'atmosphère, subissant une pression de plus en plus faible, il en résulte une dilatation qui est une source de froid intense (462), et qui amène la condensation des vapeurs. C'est par cette raison que les hautes montagnes, arrêtant les courants aériens et les forçant à s'élever, sont une cause abondante de pluie.

3° Un courant d'air chaud et humide, qui se mélange avec un air plus froid, subit un refroidissement qui entraîne encore la condensation des vapeurs. C'est ainsi que les vents chauds et humides du sud et du sud-ouest, en se mélangeant à l'air plus froid de nos latitudes, donnent de la pluie. Les vents du nord et du nord-est, qui sont froids, tendent aussi, en se mélangeant à notre atmosphère, à en condenser les vapeurs; mais comme, par l'effet même de leur basse température, ces vents sont très-secs, le mélange résultant atteint rarement la saturation, et généralement ils ne donnent pas de pluie.

913. **Pluie.** — La *pluie* est la chute, à l'état de gouttelettes, de l'eau provenant de la condensation, dans les hautes régions de l'atmosphère, des vapeurs qui s'élèvent du sol. Le plus souvent ce ne sont pas les nuages qu'on voit flotter dans l'air qui donnent la pluie; mais celle-ci se produit au moment même de la condensation des vapeurs, et les gouttelettes atteignent une grosseur d'autant plus forte, qu'elles tombent d'une plus grande hauteur.

On mesure la quantité de pluie qui tombe annuellement dans un lieu au moyen du *pluviomètre* ou *udomètre*. C'est un vase cylindrique M (fig. 791 et 792), fermé à sa partie supérieure par un couvercle B, qui a la forme d'un entonnoir dans lequel tombe l'eau de pluie. Celle-ci pénètre ensuite dans le vase par un petit trou, de manière à être soustraite le plus possible à l'évaporation. De la partie inférieure part un tube de verre A dans lequel l'eau s'élève à la même hauteur qu'à l'intérieur, hauteur qu'on lit sur une échelle graduée en millimètres, placée sur le côté du tube. L'appareil étant placé dans un lieu découvert, si, au bout d'un mois par exemple, la hauteur de l'eau dans le tube est de 0m,05, cela indique que, dans le vase, l'eau a atteint cette hauteur, et, par conséquent, que si l'eau tombée était étendue sur le sol, sans évaporation ni infiltration, il y en aurait une couche de 0m,05.

On a constaté, à l'Observatoire de Paris, que la quantité de pluie recueillie dans le pluviomètre est d'autant plus grande, que cet instrument est moins élevé au-dessus du sol. La même remarque a été faite

[illegible] et en Amérique. On a d'abord attribué le baromètre à ce que les gouttes de pluie, en tombant, entraînent des trombes moins d'air qu'elles traversent, commencent à vaincre contenu [illegible], et vont par suite en augmentant de volume et en [illegible] plus de pluie à la surface du sol. Une certaine [illegible] à objecter à cette théorie que l'existence et la quantité d'eau à la surface du sol sur celle du tonneau, une certaine [illegible] aux à expliquer cette qui pourrait résulter de la condensation.

Fig. 72.

[illegible] mal le trajet des gouttes de pluie des nuages jusqu'à [illegible] a donc attribué la différence dont il s'agit à une cause journalière, et l'on admet aujourd'hui que cette différence est occasionnée par les rosées qui se produisent dans l'air autour du pluviomètre. [illegible] d'abord pour sensible, qu'il est plus élevé au-dessus du [illegible] ayant pour effet de disperser les gouttelettes qui tombent dans l'instrument et diminuant ainsi la quantité d'eau qu'il reçoit. [illegible] il reste évident que si les gouttes de pluie traversent un [illegible] de, elles peuvent, d'après leur température, grossir [illegible] et augmenter de volume. Si, au contraire, elles traversent un [illegible] les gouttelettes tendent à se vaporiser, et il tombe moins [illegible] le sol qu'à une certaine hauteur : il peut même arriver ainsi [illegible] pluie n'atteigne pas la terre.

[illegible] nombre de circonstances locales peuvent faire varier la [illegible] d'eau qui tombe dans divers pays ; mais, toutes choses égales [illegible], c'est dans les pays chauds qu'il doit pleuvoir davantage, car [illegible]isation y est plus abondante. On observe, en effet, que la quantité de pluie décroît de l'équateur aux pôles. A Paris, la hauteur d'eau [illegible]be annuellement est 0m,564 ; à Bordeaux, de 0m,650 ; à Madère, [illegible]7 ; à la Havane, de 2m,32 ; à Saint-Domingue, de 2m,73.

[illegible]ntité de pluie varie avec les saisons. A Paris, l'hiver, la hauteur [illegible]i tombe égale 0m,107 ; au printemps, 0m,171 ; en été, 0m,101 ; [illegible]nne, 0m,122. C'est donc l'hiver qu'il tombe le moins d'eau.

[illegible]rouillards. — Les *brouillards* sont des masses de vapeur d'eau [illegible]densées dans l'atmosphère, en occupent les basses régions et [illegible]lent la transparence. Ce sont de vrais nuages, qui se forment

à la surface du sol par le refroidissement des couches inférieures de l'atmosphère. Les *brumes* sont des brouillards très-épais.

915. **Rosée, serein, gelée blanche.** — La *rosée* n'est autre chose que de la vapeur qui se condense et se dépose en gouttelettes sur les corps pendant la nuit. Ce phénomène est dû au refroidissement qu'éprouvent par l'effet du rayonnement nocturne (463) les corps placés à la surface du sol. Leur température s'abaissant alors de plusieurs degrés au-dessous de celle de l'air, il arrive, surtout dans les saisons chaudes, que cette température devient inférieure à celle à laquelle l'atmosphère serait saturée. C'est alors que les couches d'air en contact avec les corps, et sensiblement à la même température qu'eux, laissent déposer une partie de la vapeur qu'elles contiennent; phénomène analogue à celui qui se produit quand, dans une pièce chaude et humide, on apporte une carafe d'eau fraîche : les vapeurs de l'air se condensent sur ses parois.

D'après cette théorie, due à l'Anglais Wells, toutes les causes qui favorisent le refroidissement des corps augmentent la rosée. Ces causes sont : le pouvoir émissif des corps, l'état du ciel et l'agitation de l'air. Les corps qui ont un grand pouvoir émissif, se refroidissant davantage, doivent condenser plus de vapeur. En effet, le dépôt de rosée est généralement nul sur les métaux, dont le pouvoir émissif est faible, surtout s'ils sont polis; tandis que la terre, le sable, le verre, les plantes, qui ont un grand pouvoir émissif, se recouvrent abondamment de rosée.

L'état du ciel a aussi une grande influence sur la rosée. S'il est sans nuages, les espaces planétaires, qui sont à une très-basse température, n'envoient vers la terre qu'une quantité de chaleur inappréciable, et le sol se refroidissant alors rapidement par le rayonnement nocturne, il y a un abondant dépôt de rosée. Mais s'il y a des nuages, ceux-ci, dont la température est beaucoup moins basse que celle des espaces planétaires, rayonnent vers le sol, et, par suite, les corps à la surface de la terre n'éprouvant plus qu'un faible refroidissement, le dépôt de rosée n'a pas lieu.

Le vent a aussi une influence sur la quantité de vapeur qui se dépose. S'il est faible, il l'augmente en renouvelant l'air; mais s'il est fort, il la diminue en échauffant les corps par son contact, et en ne laissant pas à l'air le temps de se refroidir. Enfin, le dépôt de rosée est d'autant plus abondant, que l'air est plus humide; car il est plus près de son point de saturation.

Le *serein* est une précipitation d'eau en pluie très-fine, sans qu'il y ait apparence de nuage. Ce phénomène se produit pendant les grandes chaleurs, dans les lieux humides, au coucher du soleil, quand les couches inférieures de l'air se refroidissent au-dessous du point de saturation.

La *gelée blanche* et le *givre* résultent, comme la rosée, des vapeurs contenues dans l'atmosphère, lorsque ces vapeurs se condensent sur des corps à une température au-dessous de zéro. La forme floconneuse que présentent les petits cristaux dont le givre est formé, fait voir qu'ici les vapeurs se congèlent immédiatement sans passer par l'état liquide. Le givre se dépose, de même que la rosée, sur les corps qui rayonnent davantage, tels que les tiges et les feuilles des végétaux, et le dépôt se fait principalement sur les parties tournées vers le ciel.

, grésil, verglas. — La *neige* est de l'eau solidifiée en pe-
étoilés, diversement ramifiés et flottant dans l'atmosphère.
: proviennent de la congélation des gouttelettes qui forment
lorsque leur température descend au-dessous de zéro. Ils
t plus réguliers, qu'ils se sont formés dans un air plus
· les observer, on les reçoit sur un corps noir et on les re-
ane forte loupe. La régularité et en même temps la variété

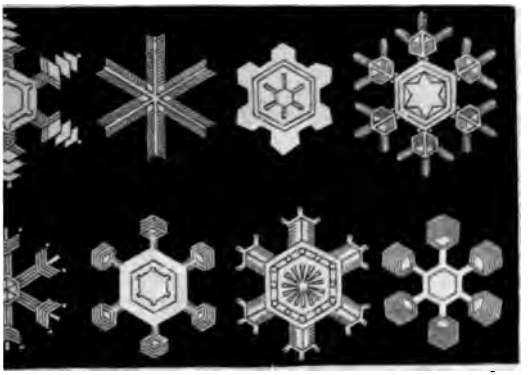


Fig. 793.

ges sont vraiment admirables. La figure 793 fait voir quel-
es formes que présentent les cristaux de neige, quand on
u microscope. Leurs variétés s'élèvent à plusieurs centaines.
'autant plus dans un lieu qu'il est plus voisin des pôles ou
u-dessus du niveau des mers. Vers les pôles, la terre est
t couverte de neige; il en est de même sur les hautes mon-
ègnent des neiges perpétuelles, même sous l'équateur.
qui est aussi de l'eau solidifiée, est formé de petites aiguilles
sées les unes contre les autres d'une manière confuse. On
formation à la congélation brusque des gouttelettes des
un air agité.
: est une couche de glace unie et transparente qui se dé-
sol. La condition nécessaire pour sa formation est que la
du sol étant au-dessous de zéro, après quelques jours d'un
ı, il vienne à tomber un peu de pluie : celle-ci se congèle
is s'il en tombe une plus grande quantité, le sol s'échauffe
ı ne se forme pas.
. — La *grêle* est un amas de globules de glace compactes,
ıs volumineux, qui tombent de l'atmosphère. Dans nos cli-
lle s'observe principalement pendant le printemps et l'été,
s les plus chaudes de la journée; il en tombe fort rare-
. La chute de la grêle est toujours précédée d'un bruisse-
lier.

La grêle est généralement le précurseur des orages ; il est rare qu'elle les accompagne, plus rare qu'elle les suive. La grosseur des grêlons est très-variable : elle atteint fréquemment celle d'une noisette. On en a observé de la grosseur d'un œuf de pigeon, du poids de 200 à 300 grammes. Aucune théorie n'explique d'une manière satisfaisante la formation des grêlons, et surtout comment ils peuvent atteindre un tel poids avant de tomber. Dans la théorie de Volta (713), les grêlons sont successivement attirés par deux nuages chargés d'électricités con-

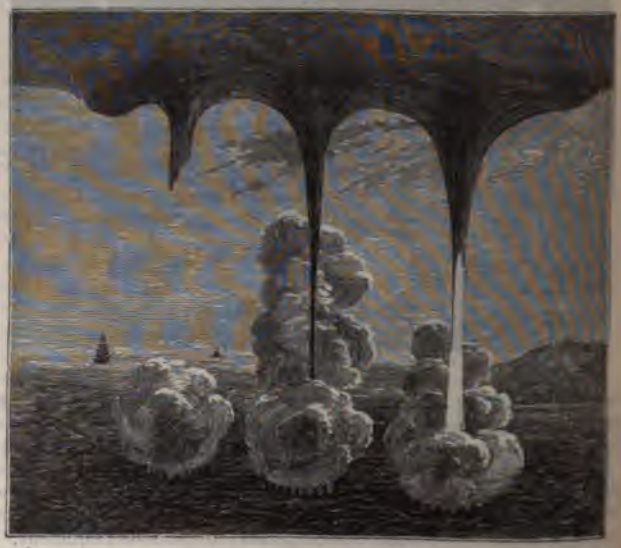


Fig. 794.

traires; mais si les grêlons étaient ainsi attirés, à plus forte raison les deux nuages le seraient l'un par l'autre et se confondraient.

De Saussure admettait que les grêlons commencent à se former dans les hautes régions de l'atmosphère, et augmentent de volume en tombant. M. de la Rive pense que la grêle provient de gouttes d'eau refroidies au-dessous de zéro et se solidifiant brusquement (338). M. Dufour admet aussi que les grêlons sont dus à la congélation brusque de globules d'eau flottant dans la région des nuages, et y ayant conservé l'état liquide à une température inférieure à zéro. Quelques globules venant à se solidifier, dès qu'ils heurtent d'autres globules encore liquides, ceux-ci se solidifiant instantanément, ainsi qu'on l'a vu en traitant de la surfusion (338), les nouveaux globules se soudent aux premiers, ce qui explique le volume qu'atteignent parfois les grêlons.

918. **Trombes.** — Les *trombes* sont des amas de vapeurs en suspen-

les couches inférieures de l'atmosphère, qu'elles traversent, le plus souvent, d'un mouvement giratoire assez rapide pour les arbres, renverser les maisons, briser et détruire tout ce ncontrent.

téores, qui sont généralement accompagnés de grêle et de ent souvent des éclairs et la foudre, en faisant entendre, sur one qu'ils parcourent, le bruit d'une charrette roulant sur un eilleux. Un grand nombre de trombes ne possèdent pas de nt giratoire, et le quart environ de celles qu'on observe prenance dans une atmosphère calme.

mbes se manifestent aussi bien sur les mers que sur les contilors le phénomène présente un aspect remarquable. Les eaux t s'élèvent en forme de cône, tandis que les nuages s'abaissant ts sous la forme d'un cône renversé, les deux cônes se réunisleurs sommets et forment une colonne continue de la mer aux 794). Cependant, même en pleine mer, l'eau des trombes n'est lée, ce qui prouve qu'elles sont surtout formées de vapeurs s, et non de l'eau de la mer élevée par aspiration.

ie des trombes n'est pas connue. Kæmtz admet qu'elles sont cipalement à deux vents opposés qui passent l'un à côté de a bien à un vent très-vif qui règne dans les hautes régions sphère. Peltier et beaucoup d'autres physiciens rapportent les l une cause électrique.

* APPAREILS ENREGISTREURS

téorographe du P. Secchi. — Les phénomènes météorologiques une observation pour ainsi dire continue, de nuit comme de météorologistes ont cherché de bonne heure à construire des *enregistreurs* propres à inscrire d'une manière continue, ou ervalles donnés, les uns la direction et la vitesse du vent, les hauteurs du thermomètre ou du baromètre, d'autres enfin les de pluie tombées à différentes heures. Mais c'est surtout de- les électro-aimants et la photographie sont connus, qu'on a uire des appareils possédant assez de précision pour ce genre tion.

gleterre, M. Wheatstone, le premier, a construit un baromé- et un psychrographe dans lesquels les hauteurs du mercure imées, sur un cylindre tournant, au moyen d'un électro-ai- France, on doit à M. du Moncel un anémographe qui, à l'aide ouette, d'un moulinet de Robinson et de neuf électro-aimants, à des crayons, sur un cylindre de papier, la direction et la vent. M. Salleron a modifié l'anémographe de M. du Moncel, primant les neuf électro-aimants et les remplaçant par neuf l'acier qui frottent sur un papier électro-chimique. Lorsqu'un asse dans un de ces contacts, il trace un trait bleu sur le n cylindre tournant (865). Huit contacts marquent les direc- neuvième les vitesses.

érents appareils enregistreurs ont d'abord été isolés les uns

des autres; le P. Secchi, le savant directeur de l'observatoire du Collége Romain, a construit une machine enregistrant à la fois tous les phénomènes météorologiques, sauf les phénomènes électriques, en regard les uns des autres sur un même tableau, de manière à mettre en évidence leurs relations réciproques.

Le météorographe se compose d'un soubassement de 0m,60 de hauteur, sur lequel s'élèvent quatre montants de 2m,30 de haut. Ceux-ci portent un entablement sur lequel est placée une horloge qui règle tous les mouvements de la machine. Sur deux faces opposées, les phénomènes sont enregistrés sur deux tableaux qui descendent d'un mouvement lent, réglé par l'horloge. L'un fait sa course en dix jours, l'autre en deux. Sur le premier s'inscrivent la direction et la vitesse du vent, la température de l'air, la hauteur du baromètre et l'heure de la pluie; sur le deuxième sont répétées, mais sur une plus grande échelle, la hauteur barométrique et l'heure de la pluie; il donne, en outre, le degré d'humidité de l'air. Quant à la hauteur d'eau tombée, elle est enregistrée à part, sur le côté de la machine.

Premier tableau.

Direction du vent — Les quatre rumbs principaux sont inscrits par quatre crayons fixés à l'extrémité supérieure de tiges de laiton mince *a, b, c, d,* auxquelles correspondent respectivement les directions ouest, sud, est et nord (fig. 795). Ces tiges, qui, sur leur extrémité inférieure, peuvent recevoir un léger déplacement latéral, sont munies d'armatures de fer doux, attirées par deux électro-aimants E, E', pour les directions ouest et nord, et par deux électro-aimants placés plus bas pour les directions sud et est. Ces quatre électro-aimants, ainsi que tous ceux de la machine, fonctionnent par un courant unique, fourni par 24 couples à sable (763) modifiés par le P. Secchi. Quant au passage alternatif du courant dans l'un ou l'autre des quatre électro-aimants, il est réglé par une girouette qui, au lieu de consister en une plaque unique, comme les girouettes ordinaires, est formée de deux plaques faisant entre elles un angle de 30 degrés (fig. 796). Par cette disposition, elle présente plus de fixité dans sa direction. Sa tige repose au centre de quatre secteurs métalliques isolés les uns des autres. Sur chacun d'eux est une borne d'où part un fil de cuivre qui se rend à l'une des bornes K, sur le météorographe, et de là aux électro-aimants E, E'. Enfin, à la tige de la girouette est fixée une pièce de cuivre *o*, tournant avec elle, et en contact successivement avec chacun des secteurs. Or le courant de l'appareil, arrivant par un fil *a* à la tige de la girouette, gagne le curseur *o*, puis l'un des secteurs, qui le mène, par exemple, à l'électro-aimant du nord.

Si le courant continuait alors à passer sans interruption dans cet électro-aimant, le crayon porté par la tige *d* resterait immobile; mais de l'électro-aimant E' le courant va passer dans un second électro-aimant *n* placé au-dessus de l'horloge, et là, comme on va le voir après en parlant de la vitesse du vent, le courant est alternativement ouvert et fermé. Par suite, l'armature de la tige *d*, successivement lâchée et attirée, oscille, et son crayon, qui est toujours pressé contre le ta-

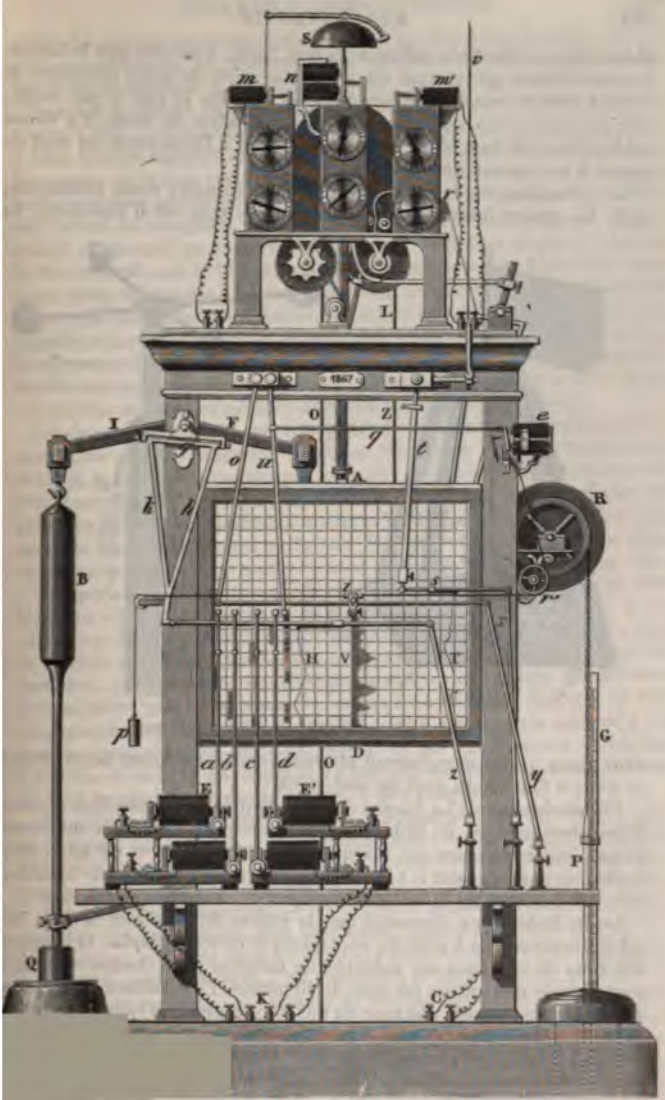


Fig. 795.

bleau AD par l'élasticité même de la tige, trace, à mesure que le tableau descend et tant que le vent est nord, une série de traits parallèles. Si le vent devient ouest par exemple, c'est aussitôt la tige *a* qui oscille, et c'est son crayon qui trace une nouvelle série de traits. La vitesse de déplacement du tableau étant connue, on a l'indication du vent régnant à un instant quelconque.

Ce mécanisme ne donne pas seulement les quatre vents principaux, mais les quatre intermédiaires. En effet, le vent est-il sud-ouest, les

Fig. 796.

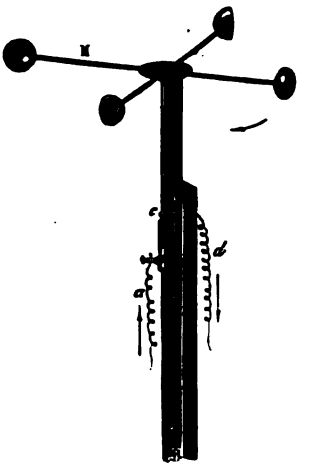


Fig. 797.

deux tiges *a* et *b* enregistrent alternativement les vents ouest et sud: ce qui est l'indice du vent du sud-ouest.

Vitesse du vent. — La vitesse du vent, donnée par le moulinet à coupes hémisphériques du Dr Robinson, est enregistrée de deux manières: 1° par deux compteurs qui marquent, en décamètres et en kilomètres, le chemin parcouru par le vent; 2° par un crayon qui trace sur le tableau une courbe dont les ordonnées sont proportionnelles à la vitesse.

Le Dr Robinson a démontré que la vitesse du moulinet M (fig. 797) est proportionnelle à celle du vent; dans le météorographe, la longueur des bras du moulinet est calculée de manière qu'à chaque révolution corresponde une vitesse du vent de 10 mètres. Le moulinet, placé à une plus ou moins grande distance du météorographe, est relié avec lui par un fil de cuivre *d* qui se rend à l'électro-aimant *n* du compteur. De plus, sa tige porte en *c* un excentrique qui, à chaque tour, touche un contact métallique en communication avec le fil *d*. Le courant de la pile arrivant au moulinet par un fil *a*, à chaque tour, ce courant se ferme une fois, va à l'électro-aimant *n*, et fait avancer d'une division l'ai-

guille du cadran placé au-dessous; d'où les divisions de celui-ci, qui sont au nombre de 50, marquent les nombres de tours et par conséquent les décamètres. Le cadran inférieur marque les kilomètres.

Quant à la courbe des vitesses, elle est tracée sur le tableau par un crayon *i* fixé à une tige horizontale. Celle-ci est reliée à ses deux bouts à deux bras de rappel *o* et *y* qui la maintiennent parallèle à elle-même. Le crayon et la tige reçoivent un mouvement latéral d'une chaîne qui passe sur deux poulies *r'* et *r*, et va s'enrouler sr une pouulie placée sur l'arbre du compteur, mais liée avec lui seulement par une roue à rochet et un encliquetage. Entraîné par le compteur et par la chaîne, le crayon trace sur le tableau, pendant une heure, un trait d'une longueur proportionnelle à la vitesse du vent. D'heure en heure, un excentrique mû par l'horloge détache de l'arbre du compteur la poulie sur laquelle s'enroule la chaîne, et cette poulie devenant folle, un poids *p*, lié au crayon *i*, ramène celui-ci à son point de départ. Toutes les lignes V, tracées successivement par le crayon, partent d'une même droite comme ordonnées, et leurs extrémités donnent la courbe des vitesses.

Le compteur central, qui enregistre la somme totale des kilomètres parcourus par les différents vents en 24 heures, devant remonter le poids *p*, est lui-même animé par un poids plus considérable. Quant aux compteurs placés à droite et à gauche, ils sont mus par des électro-aimants *m*, *m'*, et sont destinés à marquer la vitesse de vents spéciaux, par exemple des vents du nord et du sud, lorsqu'on fait communiquer leurs électro-aimants avec les secteurs nord et sud de la girouette (fig. 796).

Température de l'air. — Elle est donnée par les dilatations et contractions d'un fil de cuivre de 16 mètres de longueur, tendu, en se repliant sur lui-même, le long d'une poutre de sapin de 8 mètres, dont la dilatation est négligeable. Le tout étant placé à l'extérieur, sur les combles, par exemple, les dilatations et les contractions du cuivre se transmettent par un système de leviers à un fil *v* qui descend au météorographe, où il est lié à un levier coudé *t*. Celui-ci est articulé à une tige horizontale *s* qui porte un crayon et qui, à son autre extrémité, s'articule à un bras de rappel *x*. Le crayon, participant aux oscillations de tout le système, trace la courbe T des températures.

En outre, ce mécanisme donne indirectement l'état du ciel. En effet, si le temps est couvert, les inflexions de la courbe sont peu sensibles; si le soleil apparaît, il y a une inflexion considérable, et le passage d'un nuage suffit pour produire une inflexion brusque en sens contraire.

Pression atmosphérique. — La pression atmosphérique est enregistrée par les oscillations d'un baromètre suspendu à un balancier IF à bras égaux, oscillant en son milieu sur un couteau. Le bras F supporte un contre-poids; au bras I est suspendu le baromètre B, qui est de fer et à double section. Un cylindre de fer, ou flotteur Q, fixé à la partie inférieure du tube, plonge dans une cuvette X pleine de mercure, en sorte que la poussée du liquide fait équilibre à une partie du poids du baromètre. Par l'effet du grand diamètre de la chambre barométrique, une très-faible variation de niveau dans cette chambre fait osciller le tube barométrique et avec lui le balancier IF. Or à l'axe de celui-ci

est fixé un triangle *ghk* articulé à sa partie inférieure à une tringle horizontale, liée elle-même, à son autre extrémité, à un bras de rappel *s*. Cette tringle porte en son milieu un crayon qui, participant avec elle aux oscillations du triangle *ghk*, trace la courbe H des pressions. Les ordonnées de cette courbe varient de 3 millimètres pour une variation de 1 millimètre de la colonne de mercure. Un levier articulé, placé à la partie inférieure du tube barométrique et faisant parallélogramme avec le bras I du balancier, maintient le tube dans la position verticale.

Heure de la pluie. — L'heure de la pluie est enregistrée entre la direction des vents et la courbe H, par un crayon fixé à l'extrémité d'une tige *u* que fait marcher un électro-aimant *e*. Sur les combles est un entonnoir qui reçoit la pluie, et un long tube conduit l'eau à un petit balancier hydraulique à deux godets, placé près du météorographe (fig. 798). A l'axe du balancier arrive le courant de la pile; le godet de gauche, étant plein, bascule, et un contact *a* ferme le courant, qui se rend alors à une des bornes C et de là à l'électro-aimant *e*. Puis le godet de droite, se remplissant à son tour, bascule dans le sens opposé, et c'est le contact *b* qui conduit maintenant le courant à l'électro-aimant. En sorte qu'à chaque oscillation ce dernier attire son armature et, avec elle, la tringle *u*, qui fait marquer un trait à un crayon fixé à son extrémité. Si la pluie est abondante, les oscillations du balancier sont rapides, et les traits, très-rapprochés, donnent une teinte foncée; mais par une petite pluie les oscillations sont lentes, et les traits, plus espacés, donnent une teinte claire. Lorsque la pluie cesse, les oscillations s'arrêtent et le crayon ne marque plus aucun trait.

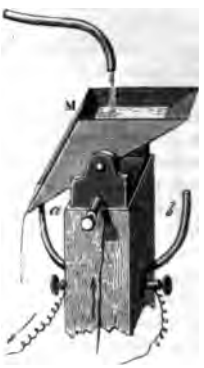


Fig. 798.

Pour compléter la description de la première face du météorographe, ajoutons que S est le timbre de la sonnerie de l'horloge; OO une corde à laquelle est suspendu le poids qui fait marcher le mouvement des heures; LZ une seconde corde qui porte le poids qui fait marcher la sonnerie; enfin, la roue U, à 8 crans, placée au-dessous du mouvement d'horlogerie, sert à remonter le tableau AD quand il est arrivé au bas de sa course.

Deuxième tableau.

Le second tableau répète les hauteurs du baromètre et les heures de la pluie identiquement de la même manière que le premier, mais sur une plus grande échelle, puisqu'il descend cinq fois plus vite. Sa fonction principale est d'enregistrer l'humidité de l'air.

Psychromètre. — L'humidité de l'air s'inscrit au moyen du psychromètre (388). T et T′ sont les thermomètres fixés sur deux planchettes (fig. 799). La mousseline qui recouvre le second est constamment hu-

par de l'eau qui tombe goutte à goutte. A la partie inférieure des nètres sont soudés, dans le verre, deux fils de platine en con- c le mercure. A leurs extrémités supérieures, les tiges thermo- es sont ouvertes, et dans ces tiges plongent deux fils de platine suspendus à un châssis métallique A, mobile sur quatre galets és par une pièce fixe B. Le châssis A, en communication avec nt de la pile, est suspendu à un fil d'acier L qui passe sur une t se rend au météorographe (fig. 800). Là est un long levier laire W qui porte une petite roue elle vient se fixer le fil L. Le le- qui tourne autour d'un axe *f*, est mouvement par une tringle *a* au l'un excentrique que fait marcher e tous les quarts d'heure. A chaque on, le levier W transmet son mou- à un chariot qui porte un télé- de Morse *x*, et, en même temps, l'acier L qui porte le châssis A). Le chariot, entraîné vers la gau- la rotation de l'excentrique, laisse scendre le châssis. Au moment où ier fil de platine atteint la colonne ure du thermomètre sec, qui est haute, le courant est fermé et va dans l'électro-aimant du chariot. ure aussitôt attirée fait marquer à on, sur le tableau, un point qui mmencement d'une ligne représen- narche du thermomètre sec. Or, le continuant à descendre, le second atine vient toucher le mercure du nètre mouillé; à ce moment, le s'établit dans un relais translateur interrompt le circuit de l'électro- *x*. Alors le crayon se détache et finit; puis, comme en revenant même le chariot reproduit les fer-

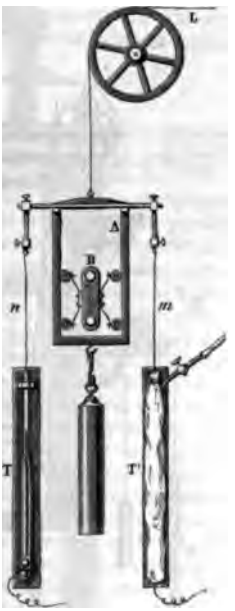


Fig. 799.

et ouvertures du courant en sens inverse, le crayon trace un oint qui est la fin de la ligne. On a ainsi deux séries de points sur deux courbes qui représentent, l'une la marche du ther- e sec, l'autre celle du thermomètre mouillé. La distance hori- de deux points de ces courbes est proportionnelle à la diffé- $-t'$ des températures marquées dans le même moment par les nètres (388).

tité de pluie. — La quantité de pluie qui tombe dans un temps st enregistrée sur un disque de papier appliqué sur une poulie la gorge de celle-ci s'enroule une chaîne à laquelle est suspen- règle de laiton P. Cette règle est fixée, à sa partie inférieure,

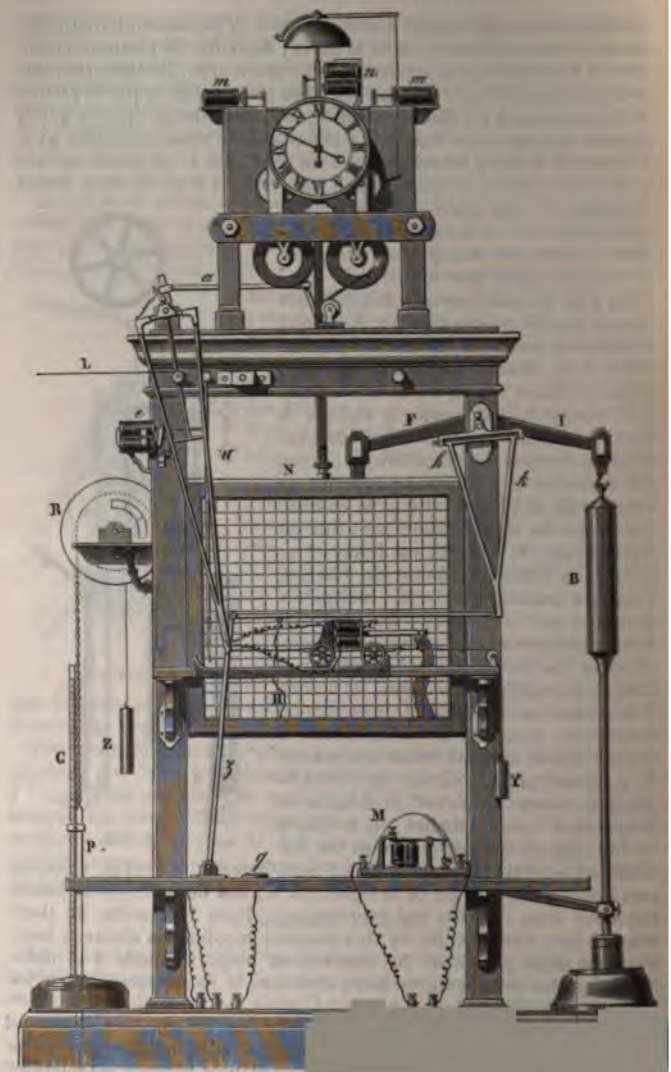


Fig. 800.

un flotteur qui plonge dans un réservoir placé dans le soubassement météorographe. A sa sortie du balancier hydraulique (fig. 798), l'eau rive à ce réservoir, et comme la section en est quatre fois moindre e celle de l'entonnoir qui reçoit la pluie, la hauteur d'eau tombée est adruplée; elle se mesure sur une échelle G divisée en millimètres. A mesure que le flotteur s'élève, un poids Z ramène la poulie en sens ntraire, et sa rotation est proportionnelle à la hauteur d'eau tombée. un crayon avance en même temps sur le disque de papier, du centre la circonférence, avec une vitesse de 5 millimètres par 24 heures; r suite, la quantité de pluie tombée chaque jour est inscrite à une ace différente sur le disque de papier.

Météores lumineux.

920. **Électricité atmosphérique, expérience de Franklin.** — Les phénènes lumineux les plus fréquents et les plus remarquables par leurs lets sont ceux produits par l'électricité libre qui se rencontre dans l'atosphère. Les premiers physiciens qui observèrent l'étincelle électrique comparèrent aussitôt à la lueur de l'éclair, et le pétillement qu'elle it entendre au bruit du tonnerre. Mais c'est Franklin qui, le premier, l'aide des batteries électriques, put établir un parallèle complet entre foudre et l'électricité, et indiquer, dans un Mémoire publié en 1749, s expériences à faire pour soutirer aux nuages orageux leur électricité moyen de pointes métalliques. Guidé par les idées théoriques de ranklin, Dalibard, physicien français, dressa dans un jardin, à Marly, ès Paris, une barre de fer isolée, de 33 mètres de hauteur, laquelle, us l'influence d'un nuage orageux, donna, le 10 mai 1752, des étinlles assez fortes pour charger plusieurs bouteilles de Leyde. Cependant Franklin, de son côté, se disposait à faire l'expérience qu'il avait noncée; il attendait pour cela qu'un clocher qui était en construction t terminé, lorsqu'il eut la pensée de faire usage d'un cerf-volant muni une pointe métallique qui pouvait atteindre à de plus hautes régions ns l'atmosphère. En juin 1752, par un temps d'orage, et avant de nnaître l'expérience de Dalibard, il se rendit donc dans un champ, ès de Philadelphie, en compagnie de son jeune fils. Là, ayant lancé cerf-volant, il attacha une clef à la corde, et à la clef un cordon de ie destiné à isoler l'appareil; puis il fixa le cordon de soie à un arbre. ant présenté la main à la clef, il ne recueillit d'abord aucune étinlle, et commençait à désespérer du succès, quand, une légère pluie nt survenue, la corde devint bon conducteur, et la clef donna l'étinlle désirée. L'émotion du célèbre physicien fut si vive, ainsi qu'il le conte lui-même dans ses lettres, qu'il ne put retenir ses larmes. Franklin, qui avait découvert le pouvoir des pointes (688), mais qui ignorait la théorie, admettait que le cerf-volant soutirait au nuage cité; mais, d'après la théorie de l'électrisation par influence hénomène doit s'expliquer par l'influence que le nuage oragait sur le cerf-volant et sur la corde.

Appareils pour apprécier l'électricité de l'atmosphère. — Les appareils dont on a fait usage pour reconnaître la présence de l'électri-

cité dans l'atmosphère sont : l'électromètre à boules de sureau, à pailles ou à feuilles d'or, l'appareil de Dalibard, des flèches lancées dans l'atmosphère, et même des cerfs-volants ou des ballons captifs.

Pour observer l'électricité pendant un temps serein, où la tension est généralement faible, on emploie de préférence l'électromètre que Saussure avait appliqué à ce genre de recherches. C'est un électromètre semblable à celui déjà décrit (698), mais dont la tige qui porte les feuilles d'or ou les pailles est surmontée d'un conducteur de 6 décimètres de hauteur, terminé en boule ou en pointe (fig. 801). Pour préserver l'appareil de la pluie, on le couvre d'un chapeau métallique d'un décimètre de diamètre. La cage de verre, qui est carrée, n'a que 5 centimètres de côté, et un cadran divisé, appliqué sur sa face antérieure, indique l'angle d'écart des feuilles d'or ou des pailles. Cet électromètre ne donne des signes d'électricité atmosphérique qu'autant qu'on l'élève dans l'atmosphère, de façon qu'il se trouve dans des couches d'air dont l'état électrique soit supérieur au sien. Une élévation de 3 décimètres suffit pour obtenir une divergence de 20 degrés par suite de l'excès d'électricité.

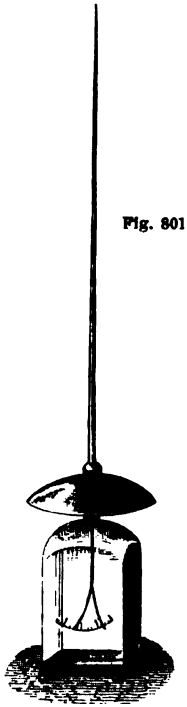


Fig. 801.

Saussure s'est aussi servi, pour reconnaître l'électricité de l'atmosphère, d'une boule de cuivre qu'il lançait verticalement avec la main. Cette boule était fixée à l'extrémité d'un fil métallique, dont l'autre bout était lié à un anneau qui pouvait glisser le long du conducteur de l'électromètre. D'après l'écart des pailles ou des feuilles d'or, on estimait l'état électrique de l'air à la hauteur où était parvenue la boule. M. Becquerel, dans des expériences faites sur le mont Saint-Bernard, a perfectionné l'appareil de Saussure, en remplaçant la boule par une flèche qu'on lançait dans l'atmosphère avec un arc fortement tendu. Un fil de soie recouvert de cinquant, de 80 mètres de longueur, était fixé d'un bout à la flèche, et communiquait de l'autre avec la tige d'un électromètre.

Peltier a fait usage d'un électromètre à feuilles d'or, portant à la partie supérieure un globe de cuivre un peu gros. Avec cet instrument, l'observateur se place dans un endroit qui domine les lieux environnants, et il suffit alors d'élever l'électromètre de quelques decimètres, pour le voir donner des signes d'électricité.

Quand on veut observer l'électricité des nuages, comme la tension électrique est alors très-considérable, on fait usage d'une longue barre métallique terminée en pointe, comme celle qu'avait adoptée Dalibard dans l'expérience décrite ci-dessus. Cette

isolée avec soin, est fixée au faîte d'un édifice, et sa partie mise en communication avec un électromètre ou même lon électrique (713, page 652), qui annonce la présence rageux. Toutefois, la barre pouvant donner alors des étin- bles, on doit placer auprès une boule métallique dont la n avec le sol soit bien établie, et qui soit plus rapprochée que l'expérimentateur lui-même, afin que, si l'étincelle t la boule qui soit frappée, et non l'observateur. Rich- seur à Saint-Pétersbourg, fut tué dans une expérience ar une étincelle qui le frappa au front.

fait usage encore de cerfs-volants munis d'une pointe, expérience de Franklin, et communiquant, au moyen d'une rte de clinquant, avec un électromètre. On a employé aussi tenus captifs par des cordes métalliques.

mètre à conducteur mobile du professeur Palmieri. — Pour ctricité de l'at- mesurer sa ten- nieri, le célèbre Observatoire du opté un électro- e en communi- atmosphère par lucteur mobile, us ou moins au- u de l'observa-

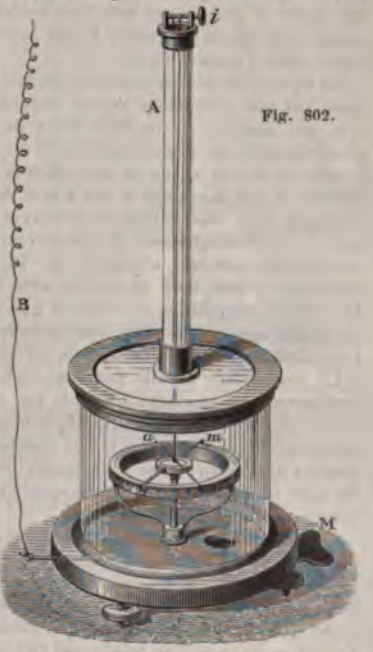


Fig. 802.

2 représente cet la figure 803 en il sur une plus le, et la figure mment on le fait ans un apparte- osé, c'est-à-dire iné ni par d'au- i par des arbres. e compose d'une surmontée d'un me matière, de s de long et ter- petit treuil *i*. enroule un fil de end passer dans xé à un disque uminium *r* (fig. vient s'enrouler sur le treuil *i*, de manière que l'écart surpasse, au sommet, de 3 à 4 millimètres l'écart infé- het qui porte le disque *r* est traversé par une aiguille , aussi d'aluminium.

Au-dessous du disque *r* est un godet de laiton K, de 27 millimètres de diamètre, et profond de 3. A ce godet sont fixées deux tiges *m* et *n*, de laiton, dépassant un peu les bords du godet, mais sans toucher l'aiguille *a b*. Du pied du même godet s'élèvent deux bras qui portent un limbe gradué sur son pourtour (fig. 802), le zéro de la graduation correspondant aux tiges fixes *m*, *n*. On lit sur ce limbe la divergence de l'aiguille *a b* quand elle s'écarte de *m n*. Enfin, du pied de la tige

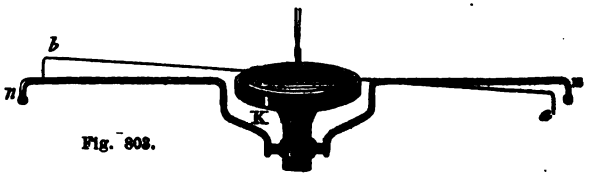


Fig. 803.

qui porte le godet part une tige métallique horizontale qui communique avec un fil de cuivre B qui se rend au conducteur mobile qu'on élève dans l'atmosphère.

La figure 804 montre comment on fait fonctionner l'électromètre. Il est posé sur une planchette devant laquelle est établi le conducteur mobile *o r*, qui consiste en un tube creux de laiton, de 2 mètres de long et d'un diamètre de 15 millimètres. Il est terminé à son sommet par un disque de laiton *x*, de 26 centimètres de diamètre, et à son bout inférieur il est mastiqué à un bâton de verre *o*, qui l'isole. Celui-ci s'engage dans une garniture de cuivre dans laquelle est une poulie qui sert à élever et abaisser le conducteur. Pour cela, un cordon de soie descend du plafond, s'enroule sur la poulie, puis remonte vers une deuxième poulie d'où on le tire avec la main. A sa partie inférieure, le conducteur mobile est relié à une tige de bois qui glisse dans un manchon au-dessous d'un plancher élevé de 2 mètres au-dessus du sol. La course du conducteur mobile est d'environ 1m,50.

Le conducteur mobile porte un chapeau conique *y*, qui, lorsque le conducteur est abaissé, s'appuie sur un cône Z, de bois ou de caoutchouc durci, et ferme l'appartement. Enfin, le conducteur étant en communication par trois lames élastiques, comme on le voit sur la gauche du dessin, avec un triangle de fer maintenu par trois cordons de soie C, c'est à ce triangle que s'attache le fil de cuivre B, qui se rend au pied de l'électromètre.

Ces détails connus, lorsqu'on élève rapidement le conducteur, celui-ci, prenant l'électricité des couches d'air qu'il atteint, la transmet par le fil B au godet K et aux bras *m n*. Ces derniers agissant par influence sur l'aiguille *a b*, qui est isolée, en soutirent l'électricité contraire; en sorte que, restant chargée de la même électricité que les bras *m n*, l'aiguille diverge d'un angle qui fait connaître la tension.

A côté de l'électromètre bifilaire est placé un électroscope de Bohnenberger P (744) qui fait connaître l'espèce d'électricité. Pour cela, on détache le fil B de l'électromètre, et on l'applique au bouton supérieur de l'électroscope. Le pôle vers lequel se porte alors la feuille d'or sur-

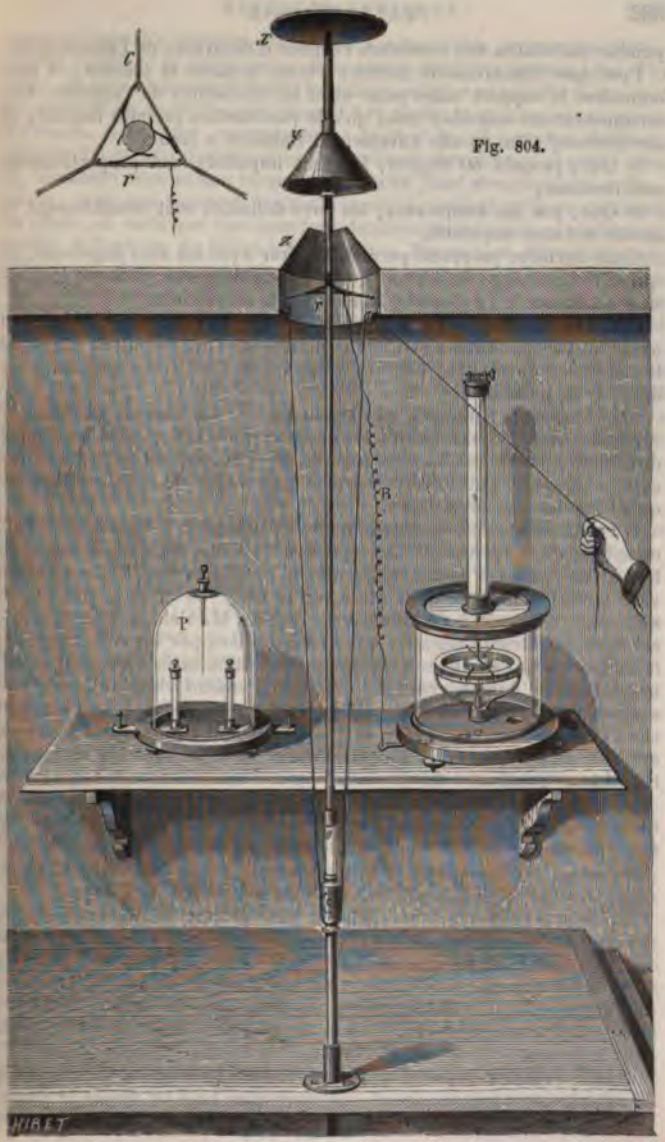


Fig. 804.

pendue au bouton fait connaître l'espèce d'électricité de l'atmosphère.

Pour que l'électromètre bifilaire puisse mesurer la tension, il faut connaître le rapport entre celle-ci et les déviations de l'aiguille. Or, en appelant arc *impulsif* celui qu'elle parcourt au premier instant, et arc *définitif* celui où elle s'arrête, M. Palmieri a trouvé :

1° Que, jusqu'à 60 degrés, les arcs impulsifs sont proportionnels aux tensions;

2° Que, par les temps secs, les arcs définitifs sont sensiblement la moitié des arcs impulsifs.

Cette dernière propriété permet d'opérer avec les arcs impulsifs, ce qui offre l'avantage de n'avoir que très-peu de perte, puisque la tension est mesurée au moment même où elle se produit.

Pendant les temps humides, on n'obtient pas les arcs qu'on devrait avoir, et l'arc définitif n'est plus la moitié de l'arc impulsif; mais de la différence entre l'arc définitif observé et l'arc théorique on peut déduire les pertes.

923. **Électricité habituelle de l'atmosphère et des nuages, sa cause.** — Après des observations continuées pendant plusieurs années, et à l'aide de l'électromètre à conducteur mobile, M. Palmieri est arrivé aux résultats suivants, qui diffèrent en plusieurs points de ceux admis jusqu'ici par les météorologistes.

1° Par un ciel serein comme par un ciel nuageux, l'électricité de l'atmosphère est toujours positive, pourvu qu'à une certaine distance du lieu d'observation il ne tombe ni pluie, ni grêle, ni neige. Cette distance varie avec l'abondance de la pluie, de la neige ou de la grêle, et son maximum est de 50 à 60 kilomètres. D'après M. Palmieri, si l'on observe de l'électricité négative dans l'atmosphère par un ciel nuageux, il ne faut point l'attribuer à des nuages négatifs, mais à ce qu'il pleut, neige ou grêle dans les contrées voisines. Pendant vingt années d'observations, à une altitude de 637 mètres, quand des nuages passaient sur l'Observatoire du Vésuve et l'enveloppaient pendant des journées entières, le savant italien a constamment observé dans les nuages de l'électricité positive.

2° L'électricité de l'atmosphère augmente à mesure que s'accroît l'humidité relative, et atteint son maximum à la chute de la pluie, de la neige ou de la grêle, non-seulement sur le lieu de l'observation, mais jusqu'à la distance de 60 kilomètres; et c'est alors seulement qu'on peut tirer des étincelles des conducteurs isolés et bien exposés.

3° Les nuages seuls n'ont pas par eux-mêmes une tension propre par rapport au milieu ambiant; et dans les nuages, ou à une petite distance de ceux-ci, on n'observe de tensions assez fortes que pendant que les vapeurs se condensent en nuages pour porter la pluie à quelque distance du lieu d'observation. En effet, on n'obtient jamais de décharge lumineuse sans qu'il y ait chute de pluie, de neige ou de grêle dans le lieu où se font les observations, ou à une certaine distance.

4° La loi suivant laquelle se manifeste l'électricité pendant les pluies tranquilles ou orageuses peut s'énoncer ainsi : *Là où tombe la pluie, il existe une forte manifestation d'électricité positive, entourée d'une*

ne d'électricité négative, suivie elle-même d'une autre zone d'électricité positive; la limite entre deux zones étant à la tension zéro. Par suite, on peut observer de fortes tensions positives ou négatives, suivant la position qu'on occupe par rapport à la pluie; et on passe d'une phase à l'autre, si la pluie, commençant à tomber à une certaine distance, approche du lieu d'observation, y tombe et s'en éloigne ensuite. D'où M. Palmieri conclut que les nuages ne sont point des conducteurs électrisés, mais une source d'électricité positive pendant qu'ils se résolvent en pluie; en sorte que c'est leur forte tension positive qui, par influence, excite, à l'entour, de l'électricité négative. En un mot, les nuages possédant une électricité négative propre n'existent pas, et s'il arrive parfois d'avoir de l'électricité négative pendant la pluie sur le lieu de l'observation, elle est due à une autre pluie beaucoup plus forte qui tombe à distance.

5° Enfin, M. Palmieri a démontré directement, par des expériences au cabinet, que les vapeurs aqueuses, en se condensant, développent de l'électricité positive; d'où il conclut que *c'est à la condensation des vapeurs dans les hautes régions de l'atmosphère qu'il faut attribuer l'électricité des nuages;* et que c'est par suite d'une condensation continue qu'un même nuage peut donner plusieurs foudres.

Ce résumé des travaux de M. Palmieri est extrait, à peu près textuellement, du mémoire qu'il a publié à Naples, en 1869, mémoire où l'on trouve en outre la description du *séismographe électro-magnétique*, appareil inventé par le même savant pour enregistrer les plus légères vibrations du sol, et annoncer ainsi les tremblements de terre.

924. Éclair. — L'*éclair* est une lumière éblouissante projetée par l'étincelle électrique qui éclate des nuages chargés d'électricité. La lumière des éclairs est blanche dans les basses régions de l'atmosphère; mais dans les hautes régions, où l'air est plus raréfié, elle prend une teinte violacée, comme le fait en pareil cas l'étincelle de la machine électrique (727).

Les éclairs ont quelquefois plusieurs lieues de longueur. Leur passage dans l'air s'opère le plus souvent en zigzag. On attribue ce phénomène à la résistance que présente l'air comprimé par le passage d'une forte décharge. L'étincelle dévie alors de la ligne droite pour prendre une direction suivant laquelle la résistance est moindre. Dans le vide, en effet, la transmission électrique ne se fait plus en zigzag.

On peut distinguer quatre sortes d'éclairs : 1° Les éclairs en zigzag, qui se meuvent avec une vitesse extrême, sous la forme d'un trait de feu à contours parfaitement déterminés, et qui sont tout à fait comparables à l'étincelle des machines électriques. 2° Les éclairs qui, au lieu d'être linéaires comme les précédents, embrassent tout l'horizon, sans présenter aucun contour apparent, comme le ferait l'éclat subit d'une explosion de matières inflammables. Ces éclairs, qui sont les plus fréquents, paraissent se produire au sein même de la nue et en éclairer la masse. 3° Les éclairs dits *de chaleur*, parce qu'ils brillent dans les nuits d'été sans qu'on aperçoive aucun nuage au-dessus de l'horizon, et sans qu'on entende aucun bruit. De nombreuses hypothèses ont été propo-

sées pour expliquer l'origine de ces éclairs. La plus probable, c'est qu'ils ne sont que des éclairs ordinaires qui éclatent dans les nues situées au-dessous de l'horizon, à des distances telles, que le roulement du tonnerre ne peut arriver jusqu'à l'oreille de l'observateur. 4° Les éclairs qui apparaissent sous la forme de globes de feu. Ces éclairs, qui sont quelquefois visibles pendant plus de dix secondes, descendent des nuages sur la terre avec assez de lenteur pour que l'œil puisse les suivre. Ces globes rebondissent souvent à la surface du sol; d'autres fois ils se divisent et éclatent avec un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. On a remarqué que c'est, en général, sous cette forme que se présente la foudre lorsqu'elle pénètre dans l'intérieur des édifices. L'origine de ces éclairs n'est pas connue.

La durée des éclairs des trois premières espèces n'est pas d'un millième de seconde, ce qui a été constaté par M. Wheatstone, au moyen d'une roue qu'on fait tourner assez vite pour que les rayons en soient invisibles; mais en les éclairant avec la lumière d'un éclair, la durée de celui-ci est si courte, que, quelle que soit la vitesse de rotation de la roue, elle apparaît complétement immobile, c'est-à-dire que son déplacement n'est pas sensible pendant la durée de l'éclair.

925. **Bruit du tonnerre.** — Le *tonnerre* est la détonation violente qui succède à l'éclair dans les nuées orageuses. L'éclair et la détonation sont toujours simultanés; mais on observe un intervalle de plusieurs secondes entre ces deux phénomènes, ce qui provient de ce que le son ne parcourt qu'environ 337 mètres par seconde (209), tandis que la lumière n'emploie qu'un intervalle inappréciable pour se propager de la nue à l'œil de l'observateur (481). Par suite, celui-ci n'entend le bruit du tonnerre que cinq ou dix secondes, par exemple, après avoir vu l'éclair, suivant qu'il est distant du nuage orageux de cinq ou dix fois 337 mètres.

Le bruit du tonnerre résulte de l'ébranlement qu'excite, dans la nue et dans l'air, la décharge électrique, ébranlement que rend sensible l'expérience du thermomètre de Kinnersley (730). Près du lieu où éclate l'éclair, le bruit du tonnerre est sec et de courte durée. Plus loin, on entend une série de bruits qui se succèdent rapidement. A une plus grande distance encore, le bruit, faible au commencement, se change en un roulement prolongé, d'intensité très-inégale. On a proposé de nombreuses hypothèses pour expliquer le roulement du tonnerre; mais aucune ne satisfait complétement. Les uns l'ont attribué à la réflexion du son sur la terre et sur les nuages; d'autres ont considéré l'éclair, non pas comme une seule étincelle, mais comme une suite d'étincelles élémentaires qui donnent lieu chacune à une détonation particulière. Ces détonations partielles partant de points diversement éloignés et de zones d'inégale densité, il en résulte que non-seulement elles arrivent à l'oreille de l'observateur successivement, mais qu'elles y apportent des sons d'inégale intensité, ce qui occasionne la durée et l'inégalité du roulement. Enfin, on a attribué ce phénomène aux zigzags mêmes de l'éclair, en admettant qu'il y a un maximum de compression de l'air à chaque angle saillant, ce qui produirait l'inégale intensité du son.

926. **Effets de la foudre.** — La *foudre* est la décharge électrique qui

s'opère entre un nuage orageux et le sol. Celui-ci, sous l'influence de l'électricité du nuage, se charge d'électricité contraire, et lorsque l'effort que font les deux électricités pour se réunir l'emporte sur la résistance de l'air, l'étincelle éclate, ce qu'on exprime, dans le langage ordinaire, en disant que la foudre *tombe;* mais il ne faudrait pas entendre par là que la foudre se dirige de préférence de haut en bas : comme les étincelles artificielles, elle tend à frapper dans tous les sens, se dirigeant toujours vers les objets les plus voisins et les mieux en rapport avec le sol. Du reste, on observe aussi des phénomènes de *foudre ascendante,* qui se produisent probablement lorsque, les nuages étant électrisés négativement, la terre l'est positivement; car toutes les expériences montrent qu'à la pression ordinaire, le fluide positif traverse plus facilement l'atmosphère que le fluide négatif.

D'après la première loi des attractions électriques (684), la foudre doit tomber sur les objets les plus rapprochés de la nue et les meilleurs conducteurs. On observe, en effet, que ce sont les arbres, les édifices élevés, les métaux, qui sont plus particulièrement frappés par la foudre. C'est pourquoi il est imprudent de se placer sous les arbres, en temps d'orage, surtout si ces arbres sont bons conducteurs, comme les chênes, les ormes. Mais le danger n'est plus le même sous les arbres résineux, comme les pins, parce qu'ils conduisent mal l'électricité.

Les effets de la foudre sont très-variés et de même nature que ceux des batteries (726), mais avec une intensité bien plus considérable. La foudre tue les hommes et les animaux, enflamme les matières combustibles, fond les métaux, brise en éclats les corps peu conducteurs. En pénétrant dans le sol elle fond les matières siliceuses qui se trouvent sur son passage, et il se produit ainsi, dans la direction de la décharge, des tubes vitrifiés qu'on a nommés *tubes fulminaires* ou *fulgurites,* qui ont jusqu'à 10 mètres de long. Enfin, en tombant sur les barres de fer, elle les aimante, et renverse souvent les pôles des aiguilles des boussoles.

La foudre répand, en général, sur son passage une odeur qu'on a comparée à celle du soufre enflammé ou d'une matière phosphoreuse. Cette odeur a été attribuée à un composé oxygéné formé sous l'influence de la décharge électrique, auquel on a donné le nom d'*ozone.* Schœnbein, en 1840, puis MM. Marignac et de la Rive, et enfin MM. Edmond Becquerel et Fremy, ont démontré que l'ozone n'est autre chose que de l'oxygène électrisé.

927. **Choc en retour.**— Le *choc en retour* est une commotion violente et même mortelle que ressentent parfois les hommes et les animaux à une assez grande distance du lieu où la foudre éclate. Ce phénomène a pour cause l'action par influence que le nuage orageux exerce sur tous les corps placés dans sa sphère d'activité. Ces corps se trouvent, ainsi que le sol, chargés d'électricité contraire à celle du nuage; mais si celui-ci se décharge par la recomposition de son électricité avec celle du sol, immédiatement l'influence cesse, et les corps revenant brusquement de l'état électrique à l'état neutre, il en résulte la secousse qui caractérise le choc en retour. On rend ce phénomène sensible en plaçant une grenouille dans le voisinage d'une forte machine électrique :

à chaque étincelle qu'on tire de celle-ci, la grenouille éprouve une secousse brusque.

928. **Paratonnerre.** — Un *paratonnerre* est une tige de fer destinée à présenter un écoulement facile à l'électricité du sol, attirée par l'électricité contraire des nuages orageux. L'invention des paratonnerres est due à Franklin, en 1755.

On distingue dans un paratonnerre deux parties : la tige et le conducteur. La *tige* est une barre de fer rectiligne, terminée en pointe, qu'on fixe verticalement au faîte des édifices qu'il s'agit de préserver; elle a de 6 à 9 mètres de hauteur, et sa section, à la base, est un carré de 5 à 6 centimètres de côté. Le *conducteur* est une barre de fer qui descend du pied de la tige jusqu'au sol, dans lequel elle pénètre profondément. Des barres de fer ne pouvant facilement, à cause de leur rigidité, suivre les contours des édifices, il est préférable de former le conducteur de cordes de fil de fer, comme celles qu'on emploie dans les ponts suspendus. L'Académie des sciences a publié, il y a quelques années, un rapport sur les paratonnerres, dans lequel elle recommande d'employer plutôt des fils de cuivre rouge que des fils de fer dans la fabrication des cordes destinées à servir de conducteur, le cuivre rouge conduisant mieux l'électricité que le fer. Ces cordes doivent avoir un centimètre carré de section métallique, et les fils de 1 millimètre à $1^{mm},5$ de diamètre; elles peuvent être cordées à trois torons, comme les cordes ordinaires. Le même rapport conseille de terminer la tige des paratonnerres par une pointe de cuivre rouge plutôt que par une pointe de platine, toujours à cause de la plus grande conductibilité.

Le conducteur se rend ordinairement dans un puits, et pour mieux établir la communication avec le sol, on le termine par deux ou trois ramifications. Si l'on n'a pas de puits à proximité, on pratique dans le sol un trou de 4 à 6 mètres de profondeur, et après y avoir introduit le pied du conducteur, on achève de remplir le trou avec de la braise de boulanger, qui conduit bien.

La théorie des paratonnerres repose sur l'électrisation par influence et sur le pouvoir des pointes. Franklin, qui, aussitôt qu il eut constaté l'identité de la foudre et de l'électricité, songea à appliquer le pouvoir des pointes aux paratonnerres, admettait que ceux-ci soutirent aux nuages orageux leur électricité; c'est le contraire qui a lieu. Lorsqu'un nuage orageux, électrisé positivement par exemple, se forme dans l'atmosphère, il agit par influence sur la terre, repousse au loin l'électricité positive et attire l'électricité négative, qui s'accumule sur les corps placés à la surface du sol, d'autant plus abondamment, que ces corps atteignent une plus grande hauteur. Les plus hauts sont alors ceux qui possèdent la plus forte tension, et qui, par conséquent, sont les plus exposés à la décharge électrique; mais si ces corps sont armés de pointes métalliques comme les tiges des paratonnerres, l'électricité négative, attirée du sol par l'influence du nuage, s'écoule dans l'atmosphère et va neutraliser l'électricité positive de la nue. Par conséquent, non-seulement un paratonnerre s'oppose à l'accumulation de l'électricité à la surface de la terre, mais encore il tend à ramener les nuées orageuses

l'état neutre, double effet qui a pour but de prévenir la chute de la udre. Cependant le dégagement d'électricité est parfois si abondant, ie le paratonnerre est insuffisant pour décharger le sol, et que la foudre late; mais c'est alors le paratonnerre qui reçoit la décharge, en rai- n de sa plus grande conductibilité, et l'édifice est préservé.

L'expérience a appris qu'une tige de paratonnerre protége autour lle un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur. Par con- quent, un bâtiment de 64 mètres de longueur est préservé par 2 tiges 8 mètres, distantes de 32 mètres.

Un paratonnerre, pour être efficace, doit satisfaire aux conditions vantes : 1° La tige doit être grosse pour ne pas être fondue, si foudre tombe dessus. 2° Elle e terminer en pointe pour donner is facilement issue à l'électricité qui se dégage du sol : c'est pour isfaire à cette condition qu'on termine ordinairement la tige par une nte de platine ou de cuivre rouge doré, afin d'éviter l'oxydation. Le conducteur ne doit présenter aucune solution de continuité de- is la tige jusqu'au sol. 4° La communication entre la tige et le sol t être la plus intime possible. 5° Si le bâtiment qu'on arme d'un para- nerre renferme des pièces mé s d'une certaine étendue, comme e couverture de zinc, des got de métal, des charpentes de fer, doit les faire communiquer e conducteur du paratonnerre. Si les trois dernières conditio sont pas remplies, on est exposé x *décharges latérales*, c'est-à e que l'étincelle peut éclater entre conducteur et l'édifice, et alor paratonnerre ne fait qu'accroître le nger.

929. **Aurore boréale.** — On no ne *aurore boréale*, ou plutôt *aurore laire*, un phénomène lumineux extrêmement remarquable qui ap- raît fréquemment, dans l'atmosphère, aux deux pôles terrestres. iand le phénomène se produit au pôle nord, on lui donne le nom *urore boréale;* celui d'*aurore australe* lorsqu'il se manifeste au pôle d. Il paraît résulter de nombreuses observations faites à Melbourne dans le nord de l'Europe que les aurores boréales et les aurores strales sont simultanées.

Nous extrayons du *Traité de météorologie* de MM. Becquerel la des- ption suivante d'une aurore boréale observée à Bossekop, en Laponie rwégienne, à 70 degrés de latitude, dans l'hiver de 1838.

Le soir, entre 4 et 8 heures, la brume qui règne habituellement au rd de Bossekop se colore à la partie supérieure. Cette lueur devient is régulière et forme un arc vague, d'un jaune pâle, tournant sa icavité vers la terre, et dont le sommet se trouve sensiblement dans méridien magnétique.

Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement les parties lumi- ises de l'arc. Des rayons lumineux se forment, s'allongent et se rac- ircissent lentement ou instantanément, leur éclat augmentant ou iinuant sensiblement. Les pieds de ces rayons offrent toujours la nière la plus vive et forment un arc plus ou moins régulier. La lon- eur des rayons est très-variée; mais tous convergent vers un même nt du ciel, indiqué par le prolongement de l'extrémité sud de l'aiguille

d'inclinaison; parfois les rayons se prolongent jusqu'à leur point de concours, et figurent ainsi le fragment d'une coupole lumineuse.

L'arc continue à monter vers le zénith, présentant, dans sa lueur, un mouvement ondulatoire. Parfois un de ses pieds, et même tous les deux, abandonnent l'horizon. Alors les plis sont plus prononcés et plus nombreux ; l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne

Fig. 805.

et se sépare en plusieurs parties, en formant des courbes gracieuses qui se replient sur elles-mêmes et offrent ce qu'on appelle la *couronne boréale*. L'éclat des rayons, variant subitement d'intensité, atteint celui des étoiles de première grandeur; les rayons dardent avec rapidité, les courbes se forment et se déroulent comme les plis et replis d'un serpent (fig. 805). Puis les rayons se colorent : la base est rouge, le milieu vert; le reste conserve sa teinte jaune clair. Enfin, l'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'affaiblit peu à peu ou s'éteint subitement.

La commission scientifique du Nord a observé, en 200 jours, 150 aurores boréales; mais il paraît qu'au pôle nord les nuits sans aurore boréale sont tout à fait exceptionnelles, en sorte qu'on peut admettre qu'il y en a toutes les nuits, seulement d'une intensité très-variable. Les aurores boréales sont visibles à des distances considérables du pôle et sur une étendue immense. Quelquefois une même aurore boréale a été vue en même temps à Moscou, à Varsovie, à Rome, à Cadix.

On a fait de nombreuses hypothèses sur la cause des aurores boréales. La direction constante de leur arc par rapport au méridien magnétique, et les perturbations qu'elles exercent sur les boussoles (656), montrent qu'elles doivent être attribuées à des courants électriques qui

se dégagent des pôles vers les hautes régions de l'atmosphère. Cette hypothèse est confirmée par ce fait, observé le 29 août et le 1er septembre 1859, en France et dans presque toute l'Europe, que deux brillantes aurores boréales ont agi puissamment sur les fils des télégraphes électriques : les sonnettes ont été longtemps agitées, et les dépêches fréquemment interrompues par le jeu spontané et anormal des appareils.

Selon M. de la Rive, les aurores boréales sont dues à des décharges électriques s'opérant dans les régions polaires, entre l'électricité positive de l'atmosphère et l'électricité négative du globe terrestre, électricités séparées elles-mêmes par l'action du soleil, principalement dans les régions équatoriales.

M. Newton a observé, sur 30 aurores boréales, que leur hauteur moyenne est de 214 kilomètres.

* 930. **Arc-en-ciel.**— L'*arc-en-ciel* est un météore lumineux qui apparaît dans les nues opposées au soleil quand elles se résolvent en pluie; il est formé de sept arcs concentriques présentant successivement les couleurs du spectre solaire. Quelquefois on n'observe qu'un seul arc-en-ciel; mais le plus souvent on en voit deux : l'un, intérieur, dont les couleurs sont plus vives; l'autre, extérieur, qui est plus pâle et dans lequel l'ordre des couleurs est renversé. Dans l'arc intérieur, c'est le rouge qui est le plus élevé; dans l'autre arc, c'est le violet. Rarement on aperçoit trois arcs-en-ciel; la théorie indique qu'il peut en exister un plus grand nombre; mais leurs couleurs sont si faibles, qu'elles échappent à la vue.

C'est la décomposition de la lumière blanche du soleil au moment où elle pénètre dans les gouttes de pluie, et sa réflexion sur leur face interne, qui produisent le phénomène de l'arc-en-ciel. Ce phénomène s'observe, en effet, dans les gouttes de rosée, dans les jets d'eau, partout, en un mot, où la lumière solaire pénètre dans des gouttes d'eau, sous un certain angle.

L'apparition de l'arc-en-ciel et son étendue dépendent de la position de l'observateur et de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon; d'où l'on doit conclure que tous les rayons réfractés par les gouttes de pluie et réfléchis sur leur concavité vers l'œil du spectateur, ne sont pas propres à produire le phénomène. Ceux qui peuvent lui donner naissance ont reçu le nom de *rayons efficaces*.

Pour se rendre compte de cette efficacité, soit une goutte d'eau *n* (fig. 806) dans laquelle pénètre un rayon solaire S*a*. Au point d'incidence *a*, une partie de la lumière se réfléchit sur la surface du liquide, l'autre y pénètre en se décomposant, et traverse le globule suivant la direction *ab*. Arrivée en *b*, une portion de la lumière émerge hors de la goutte de pluie; l'autre portion se réfléchit sur la surface concave et vient pour émerger en *g*; mais en ce point la lumière est encore réfléchie partiellement, le reste émerge dans une direction *g*O, qui forme, avec le rayon incident S*a*, un angle qu'on nomme *angle de déviation*. Ce sont les rayons tels que *g*O, sortis du côté de l'observateur, qui déterminent sur la rétine la sensation des couleurs, à la condition toutefois que la lumière soit suffisamment intense.

Or le calcul fait voir que pour une suite de rayons parallèles, qui tombent sur une même goutte, et qui ne subissent qu'une réflexion dans son intérieur, l'angle de déviation augmente successivement depuis le rayon central S''*n*, pour lequel il est nul, jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle il décroît, et que près de cette limite les rayons entrés parallèlement à eux-mêmes dans une goutte de pluie en sortent encore parallèles entre eux. De ce parallélisme, il résulte un faisceau de lumière qui possède assez d'intensité pour impressionner la rétine; ce sont donc les rayons qui sortent parallèles entre eux qui sont efficaces.

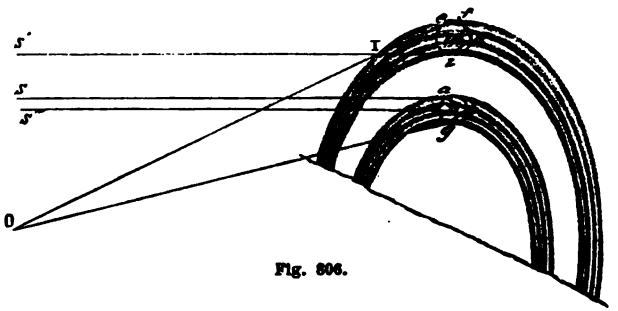


Fig. 806.

Les couleurs qui composent la lumière blanche étant inégalement réfrangibles, le maximum de l'angle de déviation n'est pas le même pour toutes. Le calcul apprend que, pour les rayons rouges, la valeur de cet angle correspondant aux rayons efficaces est de 42°2', et pour les rayons violets de 40°17'. Il suit de là que, pour toutes les gouttes placées de manière que les rayons qui vont du soleil à la goutte fassent avec ceux qui vont de la goutte à l'œil un angle de 42°2', cet organe reçoit la sensation de la couleur rouge; ce qui a évidemment lieu pour toutes les gouttes situées sur la circonférence de la base d'un cône dont le sommet coïncide avec l'œil de l'observateur, ce cône ayant son axe parallèle aux rayons solaires, et l'angle formé par deux génératrices opposées étant de 84°4'. Telle est la formation de la bande rouge de l'arc. Pour la bande violette, l'angle du cône est de 80°34'.

Les cônes correspondants à chaque bande ont le même axe, qu'on nomme *axe de vision*. Cette droite étant parallèle aux rayons du soleil, il s'ensuit que, lorsque cet astre est à l'horizon, l'axe de vision est lui-même horizontal, et l'arc-en-ciel apparaît sous la forme d'une demi-circonférence. Si le soleil s'élève, l'axe de vision s'abaisse, et avec lui l'arc-en-ciel. Enfin, lorsque le soleil est haut de 42°2', l'arc disparaît tout à fait au-dessous de l'horizon. C'est pourquoi le phénomène de l'arc-en-ciel n'a jamais lieu que le matin et le soir.

Tout ce qui précède s'applique à l'arc intérieur. Quant à l'arc extérieur, il est formé par des rayons qui ont subi deux réflexions, comme le montre le rayon S'*idfe*O dans la goutte *m*. L'angle S'IO, formé par le rayon émergent et le rayon incident, se nomme encore l'angle de

déviation. Ici cet angle n'est plus susceptible d'un maximum, mais d'un minimum, qui varie pour chaque espèce de rayons, et auquel correspondent encore les rayons efficaces. On constate par le calcul que, pour les rayons violets, l'angle minimum est de 54° 7, et pour les rayons rouges, seulement de 54° 57; ce qui explique pourquoi l'arc rouge est ici intérieur et l'arc violet extérieur. Comme, à chaque réflexion intérieure dans la goutte de pluie, il y a perte de lumière, l'arc-en-ciel extérieur offre toujours des teintes plus faibles que l'arc intérieur. L'arc extérieur cesse d'être visible lorsque le soleil est à plus de 54° au-dessus de l'horizon.

La lune produit quelquefois des arcs-en-ciel, comme le soleil; mais ils sont très-pâles.

CLIMATOLOGIE

931. **Températures moyennes.** — On nomme *température moyenne*, ou simplement *température d'un jour*, celle qu'on obtient en faisant la somme de vingt-quatre observations thermométriques prises successivement d'heure en heure, et en la divisant par 24. L'expérience a appris qu'on obtient très-approximativement cette température en prenant la moyenne entre les températures maxima et minima du jour et de la nuit, lesquelles se déterminent à l'aide des thermomètres à maxima et à minima (290 et 291). Ceux-ci doivent être à l'abri des rayons solaires, élevés au-dessus du sol, et éloignés de tout corps qui pourrait les influencer par son rayonnement.

La température d'un mois est la moyenne de celles des trente jours, et la température de l'année est la moyenne de celles des douze mois. Enfin, la *température d'un lieu* est la moyenne de sa température annuelle pendant un grand nombre d'années. La température moyenne de Paris est de 10°,67. Dans tous les cas, ces températures sont celles de l'air, et non celles du sol (448).

932. **Causes qui modifient la température de l'air.** — Les causes qui font varier la température de l'air sont principalement la latitude, l'altitude, la direction des vents et la proximité des mers.

1° *Influence de la latitude.* — L'influence de la latitude résulte du plus ou moins d'obliquité des rayons solaires; car la quantité de chaleur absorbée étant d'autant plus grande, que les rayons approchent davantage de l'incidence normale (434), il en résulte que la chaleur absorbée par le sol décroît de l'équateur vers les pôles, puisque les rayons sont de plus en plus obliques à l'horizon. Toutefois cette perte est compensée en partie, pendant l'été, dans les zones tempérées et dans les zones glaciales, par la longueur des jours. Sous l'équateur, [illegible] la longueur des jours est constante, la température est à peu près [illegible]ariable; à la latitude de Paris, et dans les contrées plus septentrio[illegible]les, où les jours sont très-inégaux, la température varie beaucoup; [illegible]is, l'été, elle s'élève quelquefois presque aussi haut que sous l'équa[illegible]r. Du reste, l'abaissement de la température résultant de la latitude [illegible] lent; ainsi, en France, par exemple, il faut avancer ver[illegible]

de 185 kilomètres pour trouver un refroidissement d'un degré dans la température moyenne de l'air.

2° *Influence de l'altitude.* — L'altitude, c'est-à-dire la hauteur au-dessus du niveau des mers, imprime à la température de l'atmosphère un décroissement beaucoup plus rapide que celui qui résulte de la latitude. En effet, dans une ascension sur le mont Blanc, Saussure a observé un abaissement de température de 1 degré pour une hauteur de 144 mètres, et de Humboldt, sur le Chimboraço, a trouvé 1 degré d'abaissement pour 218 mètres. En prenant la moyenne entre ces deux nombres, on a un refroidissement de 1 degré pour une hauteur de 181 mètres, ce qui donne un décroissement de température près de mille fois plus rapide pour l'altitude que pour la latitude.

La loi de l'abaissement de la température, quand on s'élève dans l'atmosphère, n'est pas connue, par suite des nombreuses causes perturbatrices qui tendent à la modifier, lesquelles sont les vents régnants, le degré d'humidité, l'heure de la journée, etc. L'expérience apprend que la différence de température de deux lieux inégalement élevés n'est point proportionnelle à la différence de niveau; mais que, pour des hauteurs peu considérables, on peut admettre approximativement cette loi. On évalue moyennement l'abaissement de la température de l'air à 1 degré pour 187 mètres d'élévation dans la zone torride, et à 1 degré pour 150 mètres dans la zone tempérée; mais ces nombres peuvent varier beaucoup selon les circonstances locales.

Le refroidissement de l'air, à mesure qu'on s'élève dans les hautes régions de l'atmosphère, se constate dans les ascensions aérostatiques; ce qui le prouve encore, ce sont les neiges perpétuelles qui recouvrent les sommets des hautes montagnes. Dans les Alpes, la limite des neiges persistantes se trouve à la hauteur de 2710 mètres. Les causes de la basse température qui règne dans les hautes régions de l'atmosphère sont : 1° la grande raréfaction de l'air, laquelle diminue son pouvoir absorbant; 2° l'éloignement du sol, qui ne peut échauffer l'air par son contact; 3° le grand pouvoir diathermane des gaz (439); 4° enfin la diminution de pression, par suite de laquelle l'air chaud qui s'élève du sol se dilate considérablement; or on a vu que cette dilatation est une source de froid intense (462).

3° *Influence de la direction des vents.* — Les vents participant nécessairement de la température des contrées qu'ils ont traversées, leur direction, pour un même lieu, a une grande influence sur la température de l'air. A Paris, le vent le plus chaud est le vent du sud; viennent ensuite les vents du sud-est, du sud-ouest, d'ouest, d'est, du nord-ouest, du nord, et enfin le vent du nord-est, qui est le plus froid. Du reste, le caractère des vents change avec les saisons : le vent d'est, par exemple, qui est froid l'hiver, est chaud l'été.

4° *Influence de la proximité des mers.* — La proximité des mers tend à élever la température de l'air et à la rendre plus uniforme. En effet, on observe que, sous les tropiques et dans les régions polaires surtout, la température des mers est toujours plus élevée que celle de l'atmosphère. Quant à l'uniformité de température des mers, l'expérience

apprend que, dans les régions tempérées, c'est-à-dire de 25 à 50 degrés de latitude, la différence de température entre le maximum et le minimum d'un jour ne dépasse pas, en mer, 2 ou 3 degrés, tandis que sur les continents cette différence peut aller jusqu'à 12 ou 15 degrés. Dans les îles, l'uniformité de température est très-sensible, même pendant les plus fortes chaleurs. En pénétrant dans les continents, les hivers, à latitude égale, deviennent plus froids, et la différence entre les températures des étés et des hivers devient plus grande.

933. **Lignes isothermes.**— Lorsqu'on joint entre eux, sur une carte,

Fig. 807.

tous les points dont la température moyenne est la même, on obtient des courbes que de Humboldt a fait connaître le premier, et qu'il a désignées sous le nom de *lignes isothermes*. Si la température d'un lieu ne variait qu'avec l'obliquité des rayons solaires, c'est-à-dire qu'avec la latitude, les lignes isothermes seraient toutes des parallèles à l'équateur ; mais comme cette température varie sous l'influence de plusieurs causes locales, et surtout avec la hauteur, ces lignes sont toujours plus ou moins sinueuses. Toutefois, sur les mers, elles s'éloignent peu du

parallélisme. On distingue encore des *lignes isothères* (d'égal été), et des *lignes isochimènes* (d'égal hiver). Enfin, on nomme *zone isotherme* l'espace compris entre deux lignes isothermes.

Les figures 807 et 808 représentent, d'après Humboldt, les sinuosités des lignes isothermes dans les deux hémisphères nord et sud, ceux-ci étant tracés en projection stéréographique sur le plan de l'équateur. Les

Fig. 808.

Tropique du Capricorne
Tropique du Cancer
Nouvelle Hollande
Terre Adélie
Pôle Sud
Cap de Bonne Espérance
Cap de Bonne Espérance
Cap Horn
Cap de Bonne Espérance
Cap Horn
Cap de Bonne Espérance
Cap Horn

t courbes distinctes autour de deux points P, P', qu'on a nommés s du *froid*, et dont Arago a estimé par le calcul la température enne à — 25°. L'un de ces pôles est situé en Amérique, près des Parry, l'autre en Asie.

es lignes isothermes de l'hémisphère sud sont moins bien connues celles de l'hémisphère nord; mais la figure 808 montre qu'elles beaucoup plus régulières, ce qui résulte des vastes mers de l'hé- phère austral.

l'aide des lignes isothermes, il est facile de suivre, à la surface de erre, les zones caractérisées par la rigueur ou la douceur de leur pérature moyenne. Par exemple, la zone tempérée de + 10 à + 15 rés, qui, en Europe, est comprise entre les latitudes de 50 à 42 de- s, est située, dans l'Amérique du Nord, entre les latitudes beaucoup méridionales de 40 à 36 degrés.

14. **Climats.** — On comprend sous le nom général de *climat* l'en- ble des conditions atmosphériques qui caractérisent une contrée : mpérature moyenne annuelle, les températures estivale et hiber- , l'humidité de l'air et du sol, les vents, la pression barométrique, frénité du ciel. Classés d'après leur température annuelle moyenne, climats se divisent en sept principaux : 1° *climat brûlant*, de 27°,5 degrés; — 2° *climat chaud*, de 25 à 20 degrés; — 3° *climat doux*, 0 à 15 degrés; — 4° *climat tempéré*, de 15 à 10 degrés; — 5° *climat d*, de 10 à 5 degrés; — 6° *climat très-froid*, de 5 degrés à zéro; — *limat glacé*, au-dessous de zéro.

es climats se divisent eux-mêmes en *climats constants*, dont la rence de température entre l'hiver et l'été ne dépasse pas 6 à 8 de- ; en *climats variables*, dont la même différence s'élève de 16 à 20 rés; et en *climats excessifs*, pour lesquels cette différence est plus nde que 30 degrés. Les climats de Paris et de Londres sont variables; de Pékin et de New-York, excessifs. Les climats des îles sont gé- lement peu variables, la température de la mer étant à peu près tante; de là encore la distinction en *climats marins* et en *climats tinentaux*. Le caractère des climats marins est que la différence de pérature entre l'été et l'hiver est toujours beaucoup moindre que r les climats continentaux. Du reste, comme on l'a vu ci-dessus, mpérature plus ou moins élevée n'est pas le seul caractère qui dé- mine les climats; ils le sont encore par le plus ou moins d'humidité 'air, par la quantité et la fréquence des pluies, par le nombre des ps, par la direction et l'intensité des vents, enfin par la nature du Ces causes réunies font que l'étude des climats, ou *climatologie*, encore une science fort peu connue.

15. **Distribution de la température à la surface du globe.** — La tem- ture de l'air, à la surface du globe, va en décroissant de l'équateur pôles; mais elle est soumise à des causes perturbatrices si nom- ses et tellement locales, que son décroissement ne paraît soumis cune loi générale. On ne peut jusqu'ici que constater, par des rvations nombreuses, la température moyenne de chaque lieu, es températures maxima et minima. Le tableau suivant présente

un résumé de la distribution de la chaleur dans l'hémisphère septentrional.

Températures moyennes à diverses latitudes.

Abyssinie	21°,0	Paris	10°,8
Calcutta	28°,5	Londres	10°,4
Jamaïque	26°,1	Bruxelles	10°,2
Sénégal (Saint-Louis)	24°,6	Strasbourg	9°,8
Rio-Janeiro	23°,1	Genève	9°,7
Le Caire	22°,4	Boston	9°,3
Constantine	17°,2	Stockholm	5°,6
Naples	16°,7	Moscou	3°,6
Mexico	16°,6	Saint-Pétersbourg	3°,5
Marseille	14°,1	Mont Saint-Gothard	— 1°,0
Constantinople	13°,7	Mer du Groënland	— 7°,7
Pékin	12°,7	Ile Melvil	—18°,7

Ces températures sont des moyennes; la plus haute température observée à la surface du globe a été de 47°,4, à Esné, en Égypte, et la plus basse, de — 56°,7, à Fort-Reliance, au nord de l'Amérique; ce qui donne une différence de 104°,1 entre les températures observées sur différents points du globe.

La plus haute température observée à Paris a été de 38°,4, le 8 juillet 1793, et la plus basse de — 23°,5, le 26 décembre 1798.

936. **Température des mers, courants marins.** — La température de la mer, entre les tropiques, est généralement à peu près la même que celle de l'air; dans les régions polaires, la mer est toujours plus chaude que l'atmosphère.

La température de la mer, sous la zone torride, est constamment de 26 à 27 degrés à la surface; elle diminue quand la profondeur augmente, et, dans les régions tropicales comme dans les régions tempérées, la température de la mer, à de grandes profondeurs, se maintient entre 2°,5 et 3°,5. On explique la basse température des couches inférieures par l'effet de courants sous-marins qui portent vers l'équateur l'eau froide des mers polaires, tandis que des courants chauds, se dirigeant de l'équateur vers les pôles, atténuent l'intensité du froid dans ces latitudes élevées.

Le plus important des courants marins est le *Gulf-Stream* (courant du golfe), découvert par le lieutenant américain Maury. Le parcours total de ce courant, aller et retour, est d'environ 28 000 kilomètres, et sa largeur atteint en certaines parties jusqu'à plusieurs centaines de lieues. Les navigateurs le reconnaissent facilement à sa température, qui s'élève jusqu'à 22° et 27°. Traversant l'Atlantique de l'est à l'ouest, il atteint le cap Saint-Roch au nord du Brésil, suit les côtes de l'Amérique du Sud jusqu'au golfe du Mexique, dont il sort pour se diriger vers le nord. Arrivé au banc de Terre-Neuve, il se bifurque en deux courants secondaires, dont l'un gagne l'Islande et la Norwége pour aller se perdre dans la mer Glaciale; tandis que l'autre, revenant vers le sud, gagne le golfe de Gascogne, et retourne vers le tropique en longeant les côtes occidentales de l'Afrique.

Il existe aussi dans le Grand Océan Pacifique un grand courant marin se dirigeant du golfe du Bengale vers le détroit de Behring. Tous ces courants ont pour cause la différence de température et, par suite, de densité des eaux chaudes de la mer sous les tropiques et des eaux froides des mers glaciales, et aussi la direction des vents et la configuration des côtes et des bas-fonds.

937. **Température des lacs et des sources.** — La température des lacs présente des variations beaucoup plus grandes que celle des mers; leur surface, qui peut se congeler pendant l'hiver, s'échauffe l'été jusqu'à 20 ou 25 degrés. Le fond, au contraire, conserve sensiblement une température de 4 degrés, qui est celle du maximum de densité de l'eau (317).

Les sources, provenant des eaux pluviales qui se sont infiltrées dans l'écorce du globe à des profondeurs plus ou moins considérables, tendent nécessairement à se mettre en équilibre de température avec les couches terrestres qu'elles traversent (448). Par conséquent, lorsqu'elles arrivent à la surface du sol, leur température dépend de la profondeur qu'elles ont atteinte; si cette profondeur est celle de la couche invariable, la température des sources est de 11 à 12 degrés dans nos contrées, où telle est la température de cette couche, et à peu près aussi la température moyenne annuelle. Toutefois, si la source est peu abondante, sa température est élevée en été et refroidie en hiver par celle des couches qu'elle traverse pour arriver de la couche invariable jusqu'à la surface du sol. Mais si les sources arrivent d'une profondeur plus grande que celle à laquelle est située la couche invariable, leur température peut dépasser de beaucoup la température moyenne du lieu, et elles prennent alors le nom d'*eaux thermales*. Voici la température de quelques eaux thermales :

En France.	Vichy	40°
—	Mont-Dore	44°
—	Bourbonne	50°
—	Dax (Landes)	60°
—	Chaudes-Aigues	88°
En Amérique.	Trincheras, près de Puerto-Cabello	97°
En Islande.	Le Grand-Geyser, à 20 mètres de profondeur	124°

Par leur haute température, les eaux thermales acquièrent la propriété de dissoudre plusieurs des substances minérales qu'elles rencontrent dans leur trajet, et elles se désignent alors sous le nom d'*eaux minérales*. Les substances qu'elles tiennent en dissolution sont, le plus souvent, les acides sulfureux, sulfhydrique, chlorhydrique, sulfurique, et des sulfures, des hyposulfites, des sulfates, des carbonates, des chlorures, des iodures.

La température des eaux thermales n'est point modifiée, en général, par l'abondance des pluies ou par la sécheresse; mais elle l'est par les ements de terre, après lesquels on l'a vue quelquefois s'abais- autres fois s'élever.

Distribution des eaux à la surface du globe. — La distribution aux à la surface du globe exerce une grande influence sur les cli-

mats. Les eaux présentent une superficie beaucoup plus grande que celle des continents, et leur distribution est très-inégale dans les deux hémisphères. La surface du globe, en myriamètres carrés, étant de 5 100 000, on trouve que celle des mers et des lacs est de 3 700 000 myriamètres carrés, et celle des continents et des îles de 1 400 000; c'est-à-dire que la surface des eaux est à peu près trois fois plus grande que la surface de terres. Dans l'hémisphère austral, la surface des mers est plus grande que dans l'hémisphère boréal dans le rapport de 13 à 9.

La profondeur des mers est très-variable. La sonde rencontre le fond, en général, à 300 ou 400 mètres; mais, en pleine mer, elle descend souvent à 1 200, et quelquefois elle n'atteint pas le fond à 4 000 mètres. D'après ces nombres, la masse totale des eaux, à la surface du globe, ne dépasse pas une couche liquide qui aurait 1 000 mètres de hauteur et envelopperait toute la terre.

FIN

PROBLÈMES DE PHYSIQUE

LUTIONS, DONNÉS EN SUJET DE COMPOSITION A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS ET EN PROVINCE

ECPTES GÉNÉRAUX SUR LA RÉSOLUTION DES PROBLÈMES DE PHYSIQUE

les problèmes de physique. — Les problèmes de physique sont de problèmes de mathématiques, mais dans lesquels c'est une loi physique quantités connues à l'inconnue.

blèmes étant une application de l'algèbre aux sciences physiques, on te, en général, non-seulement les quantités inconnues, mais encore les connues, par des lettres : par exemple, les volumes par V, les densités poids par P, les températures par t, les forces élastiques par F.

édant ainsi, non-seulement on généralise et on obtient des expressions s, ou *formules*, qui s'appliquent à toutes les questions de même forme, implifie et on abrége les calculs; à tel point, qu'il y a avantage pour même dans un problème dont les données sont numériques, de repré- données par des lettres, de résoudre ainsi la question d'une manière puis de remplacer, dans la formule à laquelle ils arrivent, les lettres leurs particulières qui leur correspondent.

ant cette marche, les élèves opèreront plus vite, éviteront les erreurs aciles à commettre dans un long calcul numérique; et si, enfin, la for- rale qu'ils ont obtenue est juste, les fautes de calcul qu'ils pourraient ite en remplaçant les lettres par leurs valeurs numériques seraient compensées par l'exactitude du calcul algébrique.

tion des problèmes de physique. — Que les données d'un problème résentées en lettres ou en chiffres, sa résolution se compose toujours rties bien distinctes : 1° *la mise en équation du problème*, c'est-à-dire ion en équation de la relation existant entre l'inconnue du problème ntités connues; 2° *la résolution de l'équation*.

nde partie, tout algébrique, consiste à savoir résoudre une équation r ou du deuxième degré, opération toujours facile et soumise à des riables, avec lesquelles les élèves doivent se familiariser avant d'abor- oblèmes.

la mise en équation, on peut considérer deux cas : 1° celui où les pro- nt compris dans l'une des formules déjà connues; 2° celui où, ne dé- irectement d'aucune formule donnée antérieurement, leur résolution ravail analytique spécial. De là deux genres de problèmes dont nous cessivement nous occuper.

mes qui s'appuient sur les formules données dans le cours. — mes comprennent la presque totalité des questions élémentaires de phy- ils offrent cet avantage, que la mise en équation se trouve toute faite oi de formules déjà connues; car celles-ci étant les équations de ces établies à priori d'une manière générale, il ne reste qu'à les résoudre, ne cas particulier, par rapport à la lettre qui représente l'inconnue herche.

mes qui ne s'appuient pas sur les formules du cours. — Ces pro-

blèmes présentent plus de difficulté que ceux qu'on a considérés ci-dessus; car l'équation n'étant pas donnée d'avance, il faut la trouver. Or, si la résolutio l'équation d'un problème est soumise à des règles précises et invariables, il est pas de même de sa mise en équation. En effet, la marche à suivre change pour ainsi dire, avec chaque problème, on ne peut tracer aux élèves des ri sûres et constantes. Ce qu'il faut ici, c'est une grande habitude, et même esprit de recherche et d'analyse qui ne s'acquiert pas toujours. Cependan peut, dans beaucoup de cas, s'aider avantageusement de la règle suivante, née par Lacroix, pour mettre en équation les problèmes d'algèbre :

Représenter la quantité que l'on cherche par une lettre, puis, raisonnant sur lettre absolument comme si la quantité qu'elle représente était connue, indi successivement, sur elle et sur les quantités connues du problème, la même d'opérations qu'on aurait à effectuer pour vérifier l'inconnue si elle était trou

Ces préliminaires posés, nous passons à la résolution des problèmes su différentes branches de la physique, en choisissant de préférence ceux qui été donnés en sujet de composition.

PESANTEUR, GRAVITATION UNIVERSELLE

I. — Un corps étant placé successivement dans les deux plateaux d'une bala il faut, pour lui faire équilibre dans le premier plateau, 180 grammes, et d le second, 181; on demande le poids du corps à 1 milligramme près.

D'après la formule connue $x = \sqrt{pp'}$ (55), on a $x = \sqrt{180 \times 181} = 180$

II. — On suppose qu'un homme soulève à la fois 125 boulets de canon du p de 2 kilogrammes; on demande quel serait le nombre de boulets pareils q pourrait soulever, en déployant la même force musculaire, si la terre avai volume de la lune, tout étant égal d'ailleurs. Le rayon de la terre étant pour unité, on prendra le rayon de la lune égal à 0,27234, et l'on ne tien pas compte de l'aplatissement de la terre et de la lune à leurs pôles.

Soient R le rayon de la terre et M sa masse; soient de même r et m le ray et la masse de la lune; soient enfin P le poids porté à la surface de la terre, rayon étant R, P′ celui qui serait porté si, la masse de la terre restant la mê son rayon était r; et P″ le poids qui serait porté, toujours à la surface de terre, si, avec le rayon r, elle avait la masse m de la lune.

Les deux poids P et P′ étant, à masse égale, directement proportionn aux carrés de leurs distances au centre de la terre (41), on a $\frac{P}{P'} = \frac{R^2}{r^2}$ [1]; contraire, les poids P′ et P″ étant, à distance égale, en raison inverse des masse on a $\frac{P'}{P''} = \frac{m}{M}$, ou, ce qui revient au même, à densité égale, $\frac{P'}{P''} = \frac{r^3}{R^3}$ [2], puisqu densité égale, les masses sont proportionnelles aux volumes, et ceux-ci aux cub des rayons. Multipliant membre à membre les égalités [1] et [2], il vient $\frac{P}{P''} =$

d'où $P'' = P \times \frac{R}{r} = \frac{250^k}{0,27234} = 918^k$. Donc le nombre des boulets est $\frac{918}{2} =$

Pour d'autres problèmes sur la pesanteur, voir le paragraphe 68.

HYDROSTATIQUE, CORPS FLOTTANTS ET POIDS SPÉCIFIQUES

III. — La force avec laquelle on fait marcher une presse hydraulique est d 20 kilogr.; le bras de levier sur lequel agit cette force égale 5 fois celui de la

résistance; enfin, la surface du grand piston vaut 70 fois celle du petit. On demande la pression transmise sur le grand piston.

En représentant par F la puissance, et par p la pression exercée par le levier sur le petit piston, on a, d'après le principe des leviers (49), $p \times 1 = F \times 5$ [1]. Or soit P la pression transmise au grand piston; on a, d'après le principe d'égalité de pression (81), $P \times 1 = p \times 70$ [2]. Substituant dans cette égalité la valeur de p donnée par l'égalité [1], il vient $P = 70 \times 5 \times F = 70 \times 5 \times 20^k = 7\,000^k$.

IV. — L'une des branches d'un siphon est remplie de mercure à une hauteur de $0^m,175$, l'autre est remplie d'un autre liquide à une hauteur de $0^m,42$; ces deux colonnes se faisant équilibre, on demande la densité du second liquide par rapport au mercure et par rapport à l'eau. La densité du mercure est 13,6.

En représentant par d la densité par rapport au mercure, et par d' la densité par rapport à l'eau, on a (91) $1 \times 0,175 = 0,42 \times d$, et $13,6 \times 0,175 = 0,42 \times d'$; d'où $d = 0,416$, et $d' = 5,666$.

V. — Quel effort exigerait, pour être soutenu dans du mercure à zéro, un décimètre cube de platine, la densité du mercure étant supposée égale à 13,6 et celle du platine à 21,5?

D'après la formule $P = VD$, le poids du décimètre cube de platine, en kilogrammes, est $1 \times 21,5 = 21^k,5$; et le poids du mercure déplacé par le platine est $1 \times 13,6 = 13^k,6$. Or, d'après le principe d'Archimède, le platine immergé perd une partie de son poids égale à celui du mercure qu'il déplace : son poids dans ce liquide est donc $21^k,5 - 13^k,6$, ou $7^k,9$; tel est donc l'effort cherché.

VI. — Étant donné un corps A, pesant dans l'air $7^{gr},55$, dans l'eau $5^{gr},17$, et dans un autre liquide B, $6^{gr},35$, de ces données tirer la densité du corps A et celle du liquide B.

D'après l'énoncé, le poids du corps A perd dans l'eau $7^{gr},55 - 5^{gr},17 = 2^{gr},38$; c'est le poids de l'eau déplacée. Dans le liquide B, il perd $7^{gr},55 - 6^{gr},35 = 1^{gr},20$; c'est le poids du liquide B sous le même volume que celui du corps et de l'eau. Donc le poids spécifique de A est $\frac{755}{238} = 3,172$, et celui de B $\frac{120}{238} = 0,504$ (103).

VII. — On a un cube de plomb de 4 centimètres de côté qu'on veut soutenir dans l'eau en le suspendant à une sphère de liége. Quel diamètre doit avoir celle-ci pour que sa poussée de bas en haut fasse équilibre au poids du cube de plomb, le poids spécifique de ce corps étant 11,35, et celui du liége 0,24.

Le volume du cube de plomb est 64 centimètres cubes; par conséquent, son poids dans l'air est $64 \times 11,35$, et son poids dans l'eau $64 \times 11,35 - 64 = 662^{gr},40$. Si l'on représente par r le rayon de la sphère de liége, en centimètres, son volume, en centimètres cubes, sera $\frac{4\pi r^3}{3}$; donc son poids, en grammes, sera $\frac{4\pi r^3 \times 0,24}{3}$. Cela posé, le poids de l'eau déplacée par la sphère de liége étant évidemment, en grammes, $\frac{4\pi r^3}{3}$, il en résulte une poussée de bas en haut égale à

$$\frac{4\pi r^3}{3} - \frac{4\pi r^3 \times 0,24}{3} = \frac{4\pi r^3 \times 0,76}{3}.$$

Or cette poussée doit égaler le poids du plomb; donc $\frac{4\pi r^3 \times 0,76}{3} = 662^{gr},40$,

$$\text{d'où} \quad r = \sqrt[3]{\frac{1\,987,20}{3,04 \times 3,1416}} = 5^c,925; \text{ donc le diamètre} = 11^c,85.$$

VIII. — Deux liquides, dont les densités sont 1 et $\frac{2}{3}$, sont disposés l'un au-dessus de l'autre et ne se mêlent pas. On plonge dans ces liquides une sphère dont la densité est $\frac{3}{4}$. On demande, lors de l'équilibre, le rapport des segments qui seront plongés dans les deux liquides.

Soient V le volume du segment supérieur et V′ celui du segment inférieur, c'est-à-dire plongé dans le liquide le plus dense. Le poids de la sphère est $\frac{3(V+V')}{4}$, et celui des liquides déplacés $\frac{V\times 2}{3}+V'$. Or les deux poids sont égaux, donc $\frac{3(V+V')}{4}=\frac{2}{3}V+V'$, d'où $V=3V'$.

IX. — Un morceau de bois, dont la densité est 0,729, a la forme d'un cône droit. On le fait flotter sur l'eau de manière que son axe soit vertical. En mettant d'abord le sommet en bas, puis le sommet en haut, on demande quelle fraction de la hauteur du cône s'enfoncera dans chaque cas.

1° Soient V le volume total du cône, et v le volume de la partie immergée; soient H et h les hauteurs des deux cônes, D la densité du bois, d celle de l'eau. Les volumes V et v étant de même poids sont en raison inverse de leurs densités (45); on a donc $\frac{V}{v}=\frac{d}{D}$, ou $\frac{H^3}{h^3}=\frac{d}{D}$, puisque les volumes des cônes semblables sont entre eux comme les cubes des hauteurs; d'où $h^3=\frac{H^3D}{d}$. d étant égal à 1, et faisant aussi $H=1$, il vient $h=\sqrt[3]{D}=\sqrt[3]{0,729}=0,9$ de H.

2° Dans la seconde position du cône, soit v le volume non immergé, on a

$$\frac{V}{V-v}=\frac{d}{D},\quad \text{ou}\quad \frac{H^3}{H^3-h^3}=\frac{d}{D};\quad \text{d'où}\quad h^3=\frac{H^3(d-D)}{d}=1-D,$$

en faisant $H=1$ et $d=1$. Donc on a $h=\sqrt[3]{1-0,729}=0,647$ de H.

X. — On a un cylindre de platine de 0m,02 de hauteur; on y adapte un cylindre de fer de même diamètre. Quelle hauteur faut-il donner au cylindre de fer pour que sa base supérieure se maintienne à la surface du mercure, lorsqu'on plonge les deux cylindres dans ce liquide; et si le diamètre des cylindres était 0m,03, quel serait le poids du mercure déplacé? On sait que la densité du platine est 21,59, celle du mercure 13,596, et celle du fer 7,788.

1° Soient D la densité du platine, D′ celle du fer et D″ celle du mercure, soient encore h la hauteur du cylindre de platine et x celle du cylindre de fer.

Le poids du platine est. . . . . $\pi r^2 hD$;
celui du fer. . . . . $\pi r^2 xD'$;
et celui du mercure déplacé. . . . . $\pi r^2 (h+x)D''$.

$$\text{D'où}\quad hD+xD'=(h+x)D'',\quad \text{et}\quad x=\frac{h(D-D'')}{D''-D'}=\frac{2\times 7,994}{5,808}=2,75.$$

2° Le diamètre des cylindres étant 3c, on a pour le poids du mercure déplacé

$$\frac{3,1416\times 9(2+2,75)\,13,596}{4}=456^{gr},497.$$

XI. — Un cylindre de bois de hêtre flottant horizontalement sur l'eau (fig. [illegible]

demande le rapport du volume immergé au volume surnageant, sachant le poids spécifique du hêtre est 0,852, que celui de l'eau est 1.

Fig. 809.

Les deux volumes dont on cherche le rapport ayant même hauteur h, soient S et S' les segments de cercle qui leur servent de bases, le segment S étant immergé, et le segment surnageant.

Le volume immergé est Sh, le volume surnageant $S'h$, et le volume total du cylindre $(S+S')h$. Le poids du cylindre est donc $(S+S')h \times 0{,}852$, et celui de l'eau déplacée Sh; donc $(S+S')h \times 0{,}852 = Sh$; d'où $\frac{S'}{S} = 0{,}173$.

— Quel est le poids de fer qu'il faut suspendre à un décimètre cube de liége pour faire affleurer le cube dans l'eau de mer dont la densité est 1,026. — La densité du liége est 0,24, et celle du fer 7,7.

Soit x le poids cherché en grammes. Le volume du liége en centimètres cubes est 1000, son poids en grammes est $1000 \times 0{,}24$, d'après la formule $P = VD$; le poids des deux corps flottants est $x + 1000 \times 0{,}24$.

Le volume du fer étant $\frac{x}{7{,}7}$, le poids de l'eau de mer déplacée est

$$\left(1000 + \frac{x}{7{,}7}\right) \times 1{,}026.$$

On a $x + 1000 \times 0{,}24 = \left(1000 + \frac{x}{7{,}7}\right) \times 1{,}026$; d'où $x = 906^{gr},8$.

— Un cône de fer ASB (fig. 810) plongeant dans le mercure par son sommet, on demande le rapport de la hauteur du cône immergé OS, à la hauteur totale CS, sachant que la densité du fer est d et celle du mercure d'.

Fig. 810.

Soient h la hauteur totale SC, h' la hauteur SO, R et r les rayons CB et OK. Le volume du grand cône est $\frac{\pi R^2 h}{3}$, et son poids $\frac{\pi R^2 h d}{3}$, d'après la formule $P = VD$. De même, le volume du cône immergé est $\frac{\pi r^2 h'}{3}$, et, par suite, le poids du mercure déplacé par le cône de fer est $\frac{\pi r^2 h' d'}{3}$. Or ces deux doivent être égaux; on a donc $R^2 h d = r^2 h' d'$; d'où $\frac{h'}{h} = \frac{R^2}{r^2} \times \frac{d}{d'}$ [1].

Les triangles BCS et KOS étant semblables, on a $\frac{R}{r} = \frac{h}{h'}$. Portant cette valeur dans l'équation [1], $\frac{h'}{h} = \frac{h^2}{h'^2} \times \frac{d}{d'}$; d'où $\frac{h'^2}{h^2} = \frac{d}{d'}$. Extrayant la racine

$$\frac{h'}{h} = \frac{\sqrt[2]{d}}{\sqrt[2]{d'}}.$$

C'est-à-dire que *les hauteurs des deux cônes sont inverse des racines cubiques des densités du corps immergé et du liquide, cela quel que soit l'angle au sommet du cône.*

XIV. — Un aréomètre de Baumé (pèse-acide), à tige bien cylindrique, s'enfonce jusqu'à la 66e division dans l'acide sulfurique, dont la densité est 1,8. Cela posé, on demande : 1° quelle est la densité de l'eau salée qui sert à la graduation de l'instrument; 2° quel est le rapport du volume d'une division au volume de l'aréomètre jusqu'au zéro.

Fig. 811.

1° Soient V le volume de l'aréomètre jusqu'au zéro de l'échelle, v le volume jusqu'à 66, et v' le volume jusqu'à 15 (fig. 811); les volumes de liquide déplacés dans l'eau et dans l'acide sulfurique étant en raison inverse des densités (99), on a $\frac{V}{v}=\frac{1,8}{1}$, ou $\frac{v+66}{v}=1,8$, d'où $v=82,5$, et $V=v+66=148,5$. D'ailleurs de l'égalité $V-v'=15$, on tire $v'=133,5$; donc la densité d de l'eau salée est donnée par l'égalité $\frac{V}{v'}=\frac{d}{1}$;

$$\text{d'où} \quad d=\frac{148,5}{133,5}=1,112.$$

2° Le rapport du volume d'une division au volume de l'aréomètre jusqu'au zéro est $\frac{1}{148,5}$.

XV. — Étant donnée une sphère de cuivre de 0m,18 de rayon, creuse et contenant une sphère de platine de 0m,05 de rayon, de telle sorte qu'il n'y ait aucun vide entre les deux sphères, on demande de calculer le poids de la masse ainsi formée, sachant que la densité du platine est 21,50, et celle du cuivre 8,85.

$$\text{Poids du platine} = \frac{21,50 \times 4\pi r^3}{3}, \text{ poids du cuivre} = \frac{8,85 \times 4\pi (R^3 - r^3)}{3}.$$

$$\text{Somme des poids} = \frac{4\pi}{3}(21,5\, r^3 + 8,85\, R^3 - 8,85\, r^3) =$$

$$4,1888(12,65 \times 5^3 + 8,85 \times 18^3) = 222^{k},820^{gr},92.$$

XVI. — On fabrique avec de l'or, dont la densité est 19,362, des feuilles qui ont un dix-millième de millimètre d'épaisseur; quelle surface pourrait-on recouvrir avec 10 grammes d'or?

En appelant x la surface demandée, en centimètres carrés, $x \times 0^{c},00001$ représente le volume des feuilles d'or, et $x \times 0^{c},00001 \times 19,362$ leur poids; donc on a $x \times 0^{c},00001 \times 19,362 = 10^{gr}$; d'où $x = 5^{m.c},16^{d.c},47^{c.c}$.

XVII. — Un verre à vin de Champagne, de forme conique, a intérieurement 0m,06 de diamètre au bord; il a été complétement rempli de mercure, d'eau et d'huile, en proportion telle, que la couche formée par chacun de ces liquides a 0m,05 d'épaisseur. On sait que la densité du mercure est 13,596, celle de l'huile 0,915, et celle de l'eau 1. Calculer le poids du mercure, de l'eau et de l'huile, en négligeant l'influence de la température sur la densité de ces liquides.

Fig. 812.

D'après l'énoncé, on a $om = 3^{c}$ (fig. 812), et $ok = ki = ia = 5$. De plus, les triangles oma, kna et ipa étant semblables, il s'ensuit que $ip = \frac{1}{3} om = 1$, et $kn = \frac{2}{3} om = 2$.

Cela posé, le mercure se trouvant à la partie inférieure, puis l'eau et l'huile (90), le volume du cône abp occupé par le mercure égale $\pi . \overline{ip}^2 \times \frac{ai}{3} = \frac{3,1416 \times 1 \times 5}{3} = 5^{cent.cub.},236$.

Les volumes de l'eau et de l'huile sont des troncs de cônes qui se mesurent au moyen de la formule connue $V = \frac{\pi}{3} H (R^2 + r^2 + R \times r)$, dans laquelle R et r sont les rayons des bases du tronc, et H sa hauteur.

Donc le volume d'eau $\text{beg} = \frac{3,14159 \times 5}{3} (3 + 1 + 3) = 39^{\text{mètres cubes}},832$,

et le volume d'huile $\text{nitre} = \frac{3,14159 \times 5}{3} (3 + 4 + 3) = 49^{\text{mètres cubes}},884$.

Ces volumes connus, on aura les poids demandés, d'après la formule $P = VD$, en multipliant chaque volume par la densité correspondante. On trouve ainsi que le poids du mercure est $4,236 \times 13,596 = 57^{\text{kg}},595$; celui de l'eau, $39,832 \times 1 = 39^{\text{kg}},832$; et celui de l'huile, $49,884 \times 0,915 = 45^{\text{kg}},637$.

XVIII. — Un fil cylindrique d'argent, de $0^{\text{m}},0015$ de diamètre, pèse $3^{\text{gr}},2875$; on veut le recouvrir d'une couche d'or de $0^{\text{m}},0002$ d'épaisseur; on demande le poids de l'or ainsi employé, sachant que le poids spécifique de l'argent est 10,47, et celui de l'or 19,36.

Soient r le rayon du cylindre d'argent, et R le rayon du même cylindre recouvert d'or, on a

$$r = 0^{\text{m}},075,\ R = 0^{\text{m}},076,\ r^2 = 0^{\text{mètres carrés}},005625,\ R^2 = 0^{\text{mètres carrés}},005776.$$

$$\text{Volume du cylindre d'argent} = \pi r^2 H = 0,0176715 \times H.$$

$$\text{Poids du même} = 0^{\text{décimètres cubes}},0176715 \times 10,47 \times H = 3^{\text{gr}},2875;\ \text{d'où}\ H = 17^{\text{m}},768.$$

$$\text{Volume de la couche d'or} = \pi H (R^2 - r^2) = 3,1416 \times 17,768 \times 0,0034 = 0^{\text{décimètres cubes}},189787;\ \text{d'où le poids de l'or} = VD = 3^{\text{gr}},655.$$

XIX. — On demande le prix d'un tuyau de conduite de fonte, ayant $0^{\text{m}},243$ de diamètre intérieur, $0^{\text{m}},014$ d'épaisseur, et 2134^{m} de longueur; la densité de la fonte est 7,207, et son prix $0^{\text{fr}},20$ le kilogramme.

$$\text{Prix} = 35\,039^{\text{fr}},48.$$

XX. — Déterminer les volumes de deux liquides dont les densités sont, pour l'un 1,3, et pour l'autre 0,7, sachant que, si on les mélange, le volume est égal à 3 litres et la densité à 0,9.

Soient v et v' les deux volumes demandés, on a d'abord $v + v' = 3^{\text{litres}}$ [1]; et d'après la formule $P = VD$, le poids de chaque liquide étant $v \times 1,3$ et $v' \times 0,7$, on a $1,3\,v + 0,7\,v' = 0,9 \times 3$ [2]. Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $v = 1$, et $v' = 2$.

XXI. — Les décimes nouveaux pèsent 10^{gr}, et sont composés d'un alliage de 0,95 de cuivre, 0,04 d'étain, et 0,01 de zinc; la densité du cuivre est 8,85, celle de l'étain 7,29, et celle du zinc 7,12; combien faudrait-il de ces pièces pour fournir le métal nécessaire à la fabrication d'une sphère de même alliage de $0^{\text{m}},25$ de diamètre à zéro.

Le volume v d'une pièce de 10 centimes est, d'après l'énoncé et d'après la formule $V = \frac{P}{D}$, $v = \frac{9,5}{8,85} + \frac{0,4}{7,29} + \frac{0,1}{7,12} = \frac{17491735}{15311916}$.

le de la sphère étant $\frac{4\pi R^3}{3}$, le nombre des pièces est

$$\frac{4\pi R^3}{3} : v = \frac{4 \times 3,1416 \times (12^{\text{c}},5)^3}{3} \times \frac{15311916}{17491735} = 7161,7.$$

XXII. — Un vase de forme conique a 0m,06 de diamètre à son ouverture et 0m,12 de hauteur; il est placé d'aplomb, et rempli de mercure et d'eau dans des proportions telles, que le poids du mercure est le triple du poids de l'eau. La température est zéro, la densité du mercure 13,596, et celle de l'eau 1. On demande l'épaisseur de chaque couche liquide (fig. 813).

Fig. 813.

Volume total $= \frac{1}{3}\pi R^2 H$; volume du mercure $= \frac{1}{3}\pi r^2 y$; et volume de l'eau $= \frac{1}{3}\pi(R^2H - r^2y)$. Donc le poids du mercure est $\frac{1}{3}\pi r^2 y d$, et celui de l'eau $\frac{1}{3}\pi \times (R^2H - r^2y)$; ce qui donne, d'après l'énoncé, $\frac{1}{3}r^2yd = R^2H - r^2y$; d'où $y = \frac{3R^2H}{r^2(d+3)} = \frac{R^2}{r^2} \times \frac{3H}{d+3}$.

Or $\frac{R^2}{r^2} = \frac{H^2}{y^2} = \frac{144}{y^2}$; donc $y = \frac{144}{y^2} \times \frac{36}{16,598}$, d'où $y = \sqrt[3]{\frac{144 \times 36}{16,598}} = 0^m,0673$ et $H - y = 0^m,0522$.

XXIII. — Le poids spécifique du zinc étant 7, et celui du cuivre 9, quelles quantités de zinc et de cuivre doit-on prendre pour former un alliage qui pèse 50 grammes, et dont le poids spécifique soit 8,2, en admettant que le volume de l'alliage soit exactement la somme des volumes des métaux alliés?

Soient x et y les poids de zinc et de cuivre demandés.

On a d'abord $x + y = 50$ [1]; et, d'après la formule $P = VD$, qui donne $V = \frac{P}{D}$, les volumes des deux métaux et de leur alliage sont respectivement $\frac{x}{7}$, $\frac{y}{9}$ et $\frac{50}{8,2}$; on a donc $\frac{x}{7} + \frac{y}{9} = \frac{50}{8,2}$ [2].

Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = 17,07$, et $y = 32,93$.

XXIV. — Quel est l'effort F nécessaire pour soutenir une cloche pleine de mercure et plongée dans le même liquide, son diamètre intérieur étant de 6 centimètres, sa hauteur *ob* (fig. 814) au-dessus du niveau du bain, de 18 centimètres, et sachant que la hauteur du baromètre est 0m,77?

Fig. 814.

A l'extérieur, cette cloche supporte, de haut en bas, une pression égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la section *od* et pour hauteur celle du baromètre; par conséquent cette pression égale $\pi R^2 \times 0,77 \times 13,596$.

A l'intérieur, elle supporte, de bas en haut, une pression égale à la pression atmosphérique, moins le poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la section *od* et pour hauteur *ob*; c'est-à-dire que la pression de bas en haut égale

$$\pi R^2 \times (0,77 - 0,18) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,59 \times 13,596.$$

L'effort nécessaire pour soutenir la cloche sera donc égal à la différence de ces deux pressions, ou à

$$\pi R^2 (0,77 - 0,59) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,18 \times 13,596.$$

En faisant $R = 3$ centimètres, on trouve $F = 6^k,919^{gr}$.

XXV. — A quelle hauteur s'élève l'eau au premier coup de piston dans le tuyau d'aspiration d'une pompe, la course du piston étant de $0^m,50$, la hauteur du tuyau d'aspiration de 6 mètres, et sa section $\frac{1}{10}$ de celle du piston? Au commencement de l'expérience l'air, dans le tuyau d'aspiration, est à une pression égale à celle de 10 mètres d'eau.

En représentant par 1 la section du tuyau, celle du corps de pompe est 10, et les volumes du tuyau et du corps de pompe sont respectivement 6 et 5. Donc, en représentant par x la hauteur à laquelle s'élève l'eau dans le tuyau, les volumes d'air, dans la pompe, avant et après l'ascension du piston, sont 6 à la pression 10, et $5+6-x$ à la pression $10-x$; d'où $6\times10=(11-x)(10-x)$. Résolvant, on trouve $x'=18^m,26$, et $x''=2^m,74$.

La première valeur est une *solution étrangère* qui ne satisfait évidemment pas à la question; donc la hauteur à laquelle s'élève l'eau est $2^m,74$.

LOI DE MARIOTTE ET MÉLANGE DES GAZ (156 et 165)

XXVI. — Dans un récipient de 3 litres on fait entrer : 1° 2 litres d'hydrogène à la pression de 5 atmosphères; 2° 4 litres d'acide carbonique à la pression de 4 atmosphères; 3° 3 litres d'azote à la pression de $\frac{1}{2}$ atmosphère. On demande la pression finale du mélange, la température étant supposée constante pendant l'expérience.

L'hydrogène passant du volume 2 au volume 3, sa pression diminue et devient $\frac{5\times2}{3}$; de même celle de l'acide carbonique devient $\frac{4\times4}{3}$, et celle de l'azote reste $\frac{1}{2}$. Or, d'après la troisième loi des mélanges des gaz (165), la force élastique du mélange doit égaler la somme des forces élastiques des gaz mélangés; donc la pression cherchée $=\frac{5\times2}{3}+\frac{4\times4}{3}+\frac{1}{2}=9^{atm.}+\frac{1}{6}$.

XXVII. — Un vase contenant 10 litres d'eau est d'abord exposé au contact de l'oxygène, à la pression $0^m,78$, un temps suffisant pour que l'eau absorbe tout ce qu'elle peut en dissoudre; ce même vase étant ensuite placé dans une atmosphère limitée de 100 litres d'acide carbonique, à la pression $0^m,72$, on demande les volumes des deux gaz dissous dans l'eau lorsque l'équilibre est établi. Le coefficient d'absorption de l'oxygène est 0,042, et celui de l'acide carbonique 1 (170).

Le coefficient d'absorption de l'oxygène étant 0,042, 10 litres d'eau en dissolvent $0^{lit.},42$. Or ce gaz, se comportant comme s'il était seul dans l'espace occupé par l'acide carbonique (169), occupe un volume de $100^{lit.},42$, savoir 100 litres à l'état gazeux, et $0^{lit.},42$ en dissolution dans l'eau. La tension de l'oxygène est donc $78\times\frac{0,42}{100,42}=0^c,326$.

De même, le coefficient de solubilité de l'acide carbonique étant 1, les 10 litres d'eau en dissolvent 10 litres, et le volume du gaz devient 110 litres, dont 100 à l'état gazeux et 10 en dissolution. La tension est donc $72\times\frac{100}{110}=65,454$; d'où la pression totale, après que l'équilibre s'est établi, est

$$0^c,326+65^c,454=65^c,780.$$

Donc le volume d'oxygène dissous, ramené à la pression $65^c,78$, est

$$0^{\text{lit.}},42 \times \frac{0,326}{65,780} = 0^{\text{lit.}},00208;$$

et celui de l'acide carbonique, à la même pression, $10^{\text{lit.}} \times \frac{65,4545}{65,780} = 9^{\text{lit.}},95$.

PERTE DE POIDS DANS LES GAZ, AÉROSTATS (173, 174 et 178)

XXVIII. — Pour faire équilibre au poids d'un lingot de platine placé dans le plateau d'une balance, on a placé dans l'autre plateau un poids de 27 grammes, de cuivre jaune. Combien aurait-il fallu en mettre, si la pesée avait été faite dans le vide? — On sait que la densité du platine est 21,5, celle du cuivre jaune 8,3; et que l'air à 0 degré et à la pression $0^{\text{m}},76$, condition dans laquelle on opère, pèse 770 fois moins que l'eau.

Le poids du laiton, dans l'air, n'est pas 27 grammes, car ce poids a été marqué dans le vide. Le vrai poids est 27 gr. moins le poids de l'air déplacé. Or, d'après la formule $P = VD$, le volume du laiton est $\frac{P}{D} = \frac{27^{\text{gr}}}{8,3}$; et le poids de l'air déplacé $= \frac{27^{\text{gr}}}{8,3 \times 770}$. Donc le poids réel du laiton dans l'air est $27^{\text{gr}} - \frac{27}{8,3 \times 770}$.

De même, si l'on représente par x le poids du platine dans le vide, son poids dans l'air le sera par x moins le poids de l'air déplacé, c'est-à-dire par $x - \frac{x}{21,5 \times 770}$.

Ce poids devant égaler celui du laiton, on a

$$x - \frac{x}{21,5 \times 770} = 27 - \frac{27}{8,3 \times 770}; \text{ d'où } x = 26^{\text{gr}},996.$$

XXIX. — La densité de l'air étant 1, celle de l'hydrogène 0,069, et celle de l'acide carbonique 1,524, à 0 degré et à la pression $0^{\text{m}},76$, un corps dans l'acide carbonique perd $1^{\text{gr}},15$ de son poids; on demande quelle serait sa perte de poids dans l'air et dans l'hydrogène.

On demande encore : 1° si le rapport des pertes de poids reste le même à la température de 200 degrés, la pression ne changeant pas; 2° si ce rapport reste le même à la pression de 30 atmosphères, la température étant 0 degré.

Un litre d'air à 0° et à la pression $0^{\text{m}},76$, pesant $1^{\text{gr}},3$, un litre d'acide carbonique, dont la densité est 1,524, pèse $1^{\text{gr}},3 \times 1,524 = 1^{\text{gr}},9812$. On aura donc le volume d'acide carbonique correspondant à $1^{\text{gr}},15$, en divisant $1^{\text{gr}},15$ par $1^{\text{gr}},9812$, ce qui donne pour quotient $0^{\text{lit.}},5804$. Or, ce volume étant celui du corps, celui-ci déplace $0^{\text{lit.}},5804$ d'air, et, par conséquent, sa perte de poids dans l'air (173) est $1^{\text{gr}},3 \times 0,5804 = 0^{\text{gr}},75452$. Quant à sa perte de poids dans l'hydrogène, elle est $0^{\text{gr}},75452 \times 0,069 = 0^{\text{gr}},052062$.

Le rapport des pertes de poids dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène ne reste pas le même quand la température ou la pression change, parce que ces deux gaz ne sont pas également dilatables ni également compressibles.

XXX. — Un corps perd dans l'air 7 grammes de son poids; combien perdrait-il dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène, sachant que la densité de l'acide carbonique est 1,524, et celle de l'hydrogène 0,069?

Le corps perdant 7 grammes de son poids dans l'air, perd, dans un gaz deux, trois fois plus dense, deux, trois fois davantage; donc, dans l'acide carbonique, il perd $7^{\text{gr}} \times 1,524 = 10^{\text{gr}},668$, et dans l'hydrogène $7^{\text{gr}} \times 0,069 = 0^{\text{gr}},483$.

XXXI. — Deux ballons de verre sont en équilibre dans les plateaux d'une balance; l'air est sec, à zéro et à la pression $0^{\text{m}},76$; le diamètre de l'un des ballons est $0^{\text{m}},34$, et celui de l'autre $0^{\text{m}},18$; la température s'élève à 30 degrés.

et la pression devient $0^m,74$. On demande si l'équilibre persistera. Dans le cas où il serait troublé, quel poids faudrait-il pour le rétablir, et dans quel plateau faudra-t-il le placer? Les ballons sont fermés, en sorte qu'il ne peut survenir aucune variation dans le poids du gaz qu'ils renferment. — Le poids d'un litre d'air à zéro et à $0^m,76$ est $1^{gr},293$; le coefficient de l'air est 0,00367, et le coefficient cubique du verre $\frac{1}{38700}$.

En représentant par D et d les diamètres respectifs des deux ballons en décimètres, en posant $\alpha = 0,00367$, $\delta = \frac{1}{38700}$, $t = 30$, et x étant le poids cherché, le volume du premier ballon, à 0°, est $\frac{\pi D^3}{6}$, d'après la formule connue du volume de la sphère; et le poids de l'air déplacé, à 0° et à la pression 76, est $\frac{1^{gr},293 \times \pi D^3}{6}$.

Or le volume du même ballon à t degré est $\frac{\pi D^3 (1+\delta t)}{6}$, et le poids de l'air déplacé, à t degré et à la pression 74, est $\frac{1^{gr},293 \times \pi D^3 (1+\delta t)\, 74}{6\,(1+\alpha t)\, 76}$.

74 étant plus petit que 76, et $\delta < \alpha$, cette seconde perte de poids est moindre que la première, et le ballon pèse en plus la différence de ces deux poids, ou

$$\frac{1^{gr},293 \times \pi D^3}{6}\left[1 - \frac{(1+\delta t)\, 74}{(1+\alpha t)\, 76}\right] \quad [1].$$

De même, le second ballon, à t degrés et à la pression 74, pèse en plus

$$\frac{1^{gr},293 \times \pi d^3}{6}\left[1 - \frac{(1+\delta t)\, 74}{(1+\alpha t)\, 76}\right] \quad [2].$$

Or, à cause de $d < D$, c'est le second ballon qui est le plus léger, et il faut lui ajouter un poids x égal à la différence des deux augmentations [1] et [2].

Donc $$x = \frac{1^{gr},293 \times \pi}{6}\left[1 - \frac{(1+\delta t)\, 74}{(1+\alpha t)\, 76}\right](D^3 - d^3).$$

Remplaçant et effectuant les calculs, on trouve $x = 2^{gr},770$.

XXXII. — Calculer la force ascensionnelle d'un ballon sphérique de taffetas, qui, étant vide, pèse $62^k,620$, et qui est rempli d'hydrogène impur, sachant que le taffetas verni pèse $0^k,250^{gr}$ le mètre carré, le mètre cube d'air $1^k,300^{gr}$, et le mètre cube d'hydrogène $0^k,100^{gr}$.

La surface du ballon $= \frac{62^k,620}{0^k,250} = 254^{m.car.},48$. Or, la surface du ballon, étant celle d'une sphère, est égale à $4\pi R^2$; on a donc $4\pi R^2 = 254^{m.car.},48$; d'où

$$R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{254,48}{3,1416}} = \frac{1}{2}\sqrt{81,0033} = 4^m,50;$$

$$\text{et } V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times (4,5)^3}{3} = 381^{m.cub.},7044.$$

Le poids de l'air déplacé est donc $1^k,3 \times 381,7044 = 496,^k216^{gr}$.

Le poids de l'hydrogène est $0^k,1 \times 381,7044 = 38^k,1704$; donc la force ascensionnelle est $496^k,216 - 35^k,170 - 62^k,620 = 394^k,426^{gr}$.

XXXIII. — On donne un ballon dont le rayon est de 1 mètre; ce ballon est rempli aux trois quarts de gaz hydrogène; on demande le poids qu'il pourrait enlever, sachant que la densité de l'hydrogène est 0,069, et qu'un litre d'air pèse $1^{gr},3$. L'air et l'hydrogène sont à la pression $0^m,76$ et à la température 0 degré.

Volume du ballon $= \frac{4\pi R^3}{3}$, dont les $\frac{3}{4} = \frac{4\pi R^3}{3} \times \frac{3}{4} = \pi R^3 = 3^{m.cub.},1416$. Un

mètre cube d'air pesant $1^k,300^{gr}$, le poids de l'air déplacé par le ballon est $1^k,300 \times 3,1416 = 4^k,084^{gr}$. Quant au poids de l'hydrogène qui remplit le ballon, il est $4^k,084 \times 0,069 = 0^k,281$. Donc le poids que le ballon peut enlever, y compris son propre poids, est $4^k,084 - 0^k,281 = 3^k,803^{gr}$.

XXXIV. — On a un aérostat sphérique de 4 mètres de diamètre; on l'emplit d'hydrogène impur, qui pèse 100 grammes le mètre cube; le taffetas verni dont est formée l'enveloppe pèse 250 grammes le mètre carré. On demande combien il faut d'hydrogène pour le remplir, et à quel poids il peut faire équilibre, sachant que l'air pèse 1300 grammes le mètre cube.

$$\text{On a } V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times 8}{3} = 33^{m.cub.},510,$$

$$\text{et } S = 4\pi R^2 = 4 \times 3,1416 \times 4 = 50^{m.car.},2656.$$

Par conséquent, le poids de l'hydrogène contenu dans le ballon est, d'après l'énoncé, $100^{gr} \times 33,510 = 3^k,351$; et celui de l'enveloppe égale $250^{gr} \times 50,2656 = 12^k,566$. Le poids total du ballon, y compris celui de l'hydrogène et de l'enveloppe, est donc $3^k,351 + 12^k,566 = 15^k,917$.

Mais le poids de l'air déplacé par le ballon, et, par suite, la poussée de bas en haut (173), est, d'après l'énoncé, $1^k,300 \times 33,510 = 43^k,563$. Donc le poids auquel le ballon peut faire équilibre est $43^k,563 - 15^k,917 = 27^k,646$.

MACHINES PNEUMATIQUE ET DE COMPRESSION (184 et 187)

XXXV. — Le volume d'air, dans le manomètre d'une machine de compression, est égal à 152 parties. Par le jeu de la machine, ce volume est réduit à 37, et le mercure s'est élevé, dans le tube manométrique, à $0^m,48$. On demande dans quel rapport s'est accrue la quantité d'air dans le récipient.

Fig. 815.

On a AB = 152 parties, AC = 37 parties, et $BC = 0^m,48$ (fig. 815). La pression de l'air en AC est donc, d'après la loi de Mariotte, $\frac{152}{37} = 4^m,108 = 3^m,122$, puisqu'une atmosphère est représentée par $0^m,76$. La pression dans le récipient M, où l'on comprime l'air, est donc $3^m,122 + 0^m,48 = 3^m,602$. Or la masse de l'air ayant augmenté comme la pression, elle est actuellement dans le récipient, $\frac{3^m,602}{0,76} = 4,7$. C'est-à-dire qu'elle est devenue 4 fois $\frac{7}{10}$ plus grande.

XXXVI. — Sachant que la capacité du corps de pompe d'une machine pneumatique est $\frac{1}{3}$ de la capacité du récipient, calculer après combien de coups de piston simples la pression intérieure sera la deux-centième partie de ce qu'elle était primitivement.

Soient 1 la pression atmosphérique et 1 le volume du récipient. Après l'ascension du piston, ce volume sera $1 + \frac{1}{3}$, et par conséquent la pression de l'air

sous le récipient sera $\frac{1}{1+\frac{1}{3}}$, puisqu'elle est en raison inverse du volume. De même, au second coup de piston, elle est $\frac{1}{1+\frac{1}{3}}$ de ce qu'elle était après le premier, c'est-à-dire $\frac{1}{1+\frac{1}{3}}$ de $\frac{1}{1+\frac{1}{3}}$, ou $\frac{1}{\left(1+\frac{1}{3}\right)^2}$.

On trouvera ainsi qu'après n coups de piston, la pression est $\frac{1}{\left(1+\frac{1}{3}\right)^n}$ [1].

On a donc $\frac{1}{\left(1+\frac{1}{3}\right)^n}=\frac{1}{200}$, d'où $\left(1+\frac{1}{3}\right)^n=200$, ou $\left(\frac{4}{3}\right)^n=200$.

Prenant les logarithmes, il vient $n=\frac{\log 200}{\log 4-\log 3}=18,4$.

La formule [1] ci-dessus pourrait aussi se déduire de la formule $F=H\left(\frac{V}{V+v}\right)^n$ donnée au paragraphe 184, en y faisant $H=1$, $V=1$, et $v=\frac{1}{3}$.

XXXVII. — Un manomètre à air comprimé est divisé en 110 parties d'égale capacité : quand la pression extérieure est de $0^m,76$, le mercure, dans l'intérieur du tube et dans la cuvette, se tient au zéro de l'échelle. On porte le manomètre sous le récipient d'une machine à comprimer l'air, et on voit le mercure s'élever jusqu'à la 80e division; mesurant alors la hauteur du mercure dans le tube, on la trouve de $0^m,45$; on demande la pression dans la machine.

Fig. 816.

Soit P la pression, en atmosphères, de l'air en AB (fig. 816); la portion de l'échelle correspondante à AB étant 30, on a $\frac{P}{76}=\frac{110}{30}$, d'où $P=2^m,787$. En y ajoutant la hauteur $0^m,450$ du mercure dans le tube; la pression totale est $3^m,237$.

Pour la réduire en atmosphères, il n'y a qu'à diviser $3^m,237$ par $0^m,76$, ce qui donne $4^{atm.}+\frac{1}{4}$.

XXXVIII. — On fait jouer le piston d'une machine pneumatique; la capacité du récipient est de $7^{lit.},53$, et il est rempli d'air à la pression $0^m,76$ et à la température 0°. On demande : 1° le poids de l'air lorsque la pression est réduite à $0^m,021$; 2° le poids de l'air extrait par le piston : 3° le poids de l'air qui resterait dans la cloche à la température de 15 degrés.

1° A 0° et $0^m,76$ de pression, $7^{lit.},53$ d'air pèsent $1^{gr},293\times7,53=9^{gr},736$.

A 0° et $0^m,021$ de pression, le même volume pèse donc $\frac{9^{gr},736\times21}{760}=0^{gr},269$.

2° Le poids de l'air retiré égale $9^{gr},736-0^{gr},269=9^{gr},467$.

3° Le poids de l'air qui resterait, à 15°, serait $\frac{0^{gr},269}{1+0,00367\times15}=0^{gr},255$.

XXXIX. — La cloche d'une machine pneumatique renferme 3^{lit},17 d'air; un baromètre communiquant avec la partie supérieure de la cloche, marque zéro quand celle-ci est en communication avec l'atmosphère (fig. 817). On ferme la cloche et on fait jouer la machine; le mercure s'élève alors dans le baromètre de 0^m,65. Un second baromètre, placé près de la machine, a marqué 0^m,76 pendant toute l'expérience. On demande le poids de l'air qu'on a retiré de la cloche et le poids de celui qui reste, la température étant zéro.

Fig. 817.

A 0° et à 0^m,76, le poids de l'air dans la cloche est $1^{gr},3 \times 3,17 = 4^{gr},121$.

A 0° et à la pression $76 - 65 = 11$, le poids de l'air qui reste dans la cloche est

$$\frac{1^{gr},3 \times 3,17 \times 11}{76} = 0^{gr},596.$$

Donc le poids de l'air retiré de la cloche est $4^{gr},121 - 0^{gr},596 = 3^{gr},525$.

ACOUSTIQUE (210, 242, 245, 254 et 258)

XL. — Le bruit du canon a mis 15 secondes à se transmettre d'un lieu à un autre, la température étant de 22 degrés; on demande la distance entre ces deux lieux, sachant que la vitesse du son à zéro est de 333 mètres.

On a vu (210) que la vitesse du son dans l'air, à t degrés, est donnée par la formule $v' = v\sqrt{1 + \alpha t}$, α étant le coefficient de dilatation de l'air, et égal à 0,00367, et v étant la vitesse du son à zéro.

Donc la vitesse, à 22 degrés, égale $333\sqrt{1 + 0,00367 \times 22} = 346^m$. Or cette vitesse étant le chemin parcouru par le son en une seconde, le chemin parcouru en 15 secondes est $346^m \times 15 = 5190$ mètres; c'est la distance demandée.

XLI. — La densité du fer étant 7,8, celle du cuivre 8,9, on demande quel doit être le rapport des diamètres de deux fils cylindriques, l'un de fer, l'autre de cuivre, de longueurs égales et également tendus, pour qu'ils rendent la même note lorsqu'on les fait vibrer transversalement.

D'après la formule sur les vibrations transversales des cordes, $n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$ (242), les poids, les longueurs et les nombres de vibrations étant les mêmes pour les deux fils, on a

$$\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}} = \frac{1}{r'l}\sqrt{\frac{P}{\pi d'}}, \text{ ou, simplifiant, } \frac{1}{r}\sqrt{\frac{1}{d}} = \frac{1}{r'}\sqrt{\frac{1}{d'}};$$

$$\text{d'où } \frac{r^2}{r'^2} = \frac{d'}{d} = \frac{8,9}{7,8}, \text{ donc } \frac{r}{r'} = \sqrt{\frac{8,9}{7,8}} = 1,068.$$

XLII. — Ayant laissé tomber une pierre dans un puits, le son qu'elle produit en rencontrant l'eau ne se fait entendre que 3 secondes après qu'on l'a lâchée. Quelle est la profondeur du puits, sachant que le son parcourt 337 mètres par seconde.

Représentons par v la vitesse du son, par x la profondeur du puits jusqu'à

l'eau, et par T le temps qui s'écoule entre le commencement de la chute et la perception du son. De la formule $e=\frac{1}{2}gt^2$ (60), on tire $t=\sqrt{\frac{2e}{g}}=\sqrt{\frac{2x}{g}}$; c'est temps que la pierre met à tomber.

Pour trouver le temps qu'il faut au son pour arriver à l'oreille de l'observateur, remarquons que l'espace qu'il parcourt par seconde étant v, il lui faudra, pour l'espace x, autant de secondes que x contient de fois v, c'est-à-dire $\frac{x}{v}$.

Donc $\sqrt{\frac{2x}{g}}+\frac{x}{v}=T$, ou $\sqrt{\frac{2x}{g}}=T-\frac{x}{v}$; d'où $\frac{2x}{g}=T^2-\frac{2Tx}{v}+\frac{x^2}{v^2}$.

Ou, en réduisant, $gx^2-2v(v+gT)x+v^2gT^2=0$.

Résolvant, on trouve $x=\frac{v}{g}\left\{gT+v\pm\sqrt{v(2gT+v)}\right\}$.

Remplaçant v, g et T par leurs valeurs, on trouve

$$x=\frac{337}{9,81}\left\{9,81\times 3+337\pm\sqrt{337(2\times 9,81\times 3+337)}\right.;$$

$$\text{d'où}\quad x=\frac{337}{9,81}(366,42\pm 365,24);$$

ce qui donne les deux solutions $x'=25134^m,9$, et $x''=40^m,8$. La première est à rejeter, car elle représente un espace plus grand que celui que parcourt le son en 3 secondes. C'est une *solution étrangère*, due à l'élévation au carré du radical $\sqrt{\frac{2x}{g}}$ dans l'équation du problème. La profondeur du puits est donc $40^m,8$.

XLIII. — Quelle doit être la tension, en kilogrammes, d'une corde de cuivre de $0^m,50$ de longueur et de $0^{mm},25$ de rayon, pour qu'elle fasse 800 vibrations par seconde? La densité du cuivre est 8,87.

Comme il s'agit ici du nombre absolu de vibrations, on doit faire usage de la formule $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$ (242). Remplaçant dans cette formule les lettres par les données du problème, et prenant pour unité le décimètre, il vient

$$800=\frac{1}{0,0025\times 5}\sqrt{\frac{98,088\times P}{3,1415\times 8,87}};\ \text{d'où}\ P=28^k,293^{gr},8.$$

XLIV. — Un projectile est lancé horizontalement avec une vitesse de 200 mètres à la seconde. 5 secondes après l'instant du départ on entend le bruit produit par le choc du projectile contre un obstacle. La température est zéro. On demande à quelle distance l'observateur, placé au point de départ, est de l'obstacle.

$$\frac{e}{200}+\frac{e}{333}=5^s,\ \text{d'où}\ e=624^m,5.$$

XLV. — Deux cordes de matières différentes, de même longueur et de même section, ont des densités d et d'. Chacune étant tendue par un poids égal à son propre poids, on demande le rapport des sons qu'elles peuvent rendre.

En s'appuyant sur la formule $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$, on trouve $\frac{n}{n'}=1$.

Pour d'autres problèmes sur les vibrations des cordes, voir le paragraphe 245, et pour les problèmes sur les tuyaux sonores, le paragraphe 259.

ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES

XLVI. — Un thermomètre centigrade marque 35 degrés; que doivent marquer dans le même moment un thermomètre Réaumur et un thermomètre Fahrenheit?

D'après les rapports qui existent entre les trois échelles (282), le thermomètre Réaumur marque $35 \times \frac{4}{5} = 28°$; et le thermomètre Fahrenheit $35 \times \frac{9}{5} + 32 = 95$.

XLVII. — A quelle température le thermomètre centigrade et le thermomètre Fahrenheit marquent-ils le même nombre de degrés?

x étant cette température, on a $(x - 32) \times \frac{5}{9} = x$, d'où $x = -40°$.

XLVIII. — On a deux thermomètres à mercure construits avec le même verre: l'un a une boule dont le diamètre intérieur est 0m,0075, et un tube dont le diamètre intérieur est 0m,0025; l'autre a une boule de 0m,0062 de diamètre, et un tube de 0m,0015 de diamètre intérieur. On demande quel est le rapport de longueur d'un degré du premier thermomètre à un degré du second.

Soient A et B les deux thermomètres donnés, D et D′ les diamètres des boules, d et d' les diamètres des tubes (fig. 818). Si l'on conçoit un troisième thermomètre C qui ait la même boule que B et le même tube que A, et si l'on représente par l, l', l'', les longueurs respectives d'un degré dans les trois thermomètres, les thermomètres A et C ayant des tiges de mêmes diamètres, les longueurs l et l'' sont directement proportionnelles aux volumes des boules D et D′, ou, ce qui est la même chose, aux cubes de leurs diamètres; et les thermomètres B et C ayant mêmes boules, les longueurs l'' et l' sont inversement proportionnelles aux sections des tiges, ou, ce qui revient au même, au carré de leurs diamètres.

Fig. 818.

On a donc $\frac{l}{l''} = \frac{D^3}{D'^3}$; et $\frac{l''}{l'} = \frac{d'^2}{d^2}$;

multipliant membre à membre, il vient

$$\frac{l}{l'} = \frac{D^3 d'^2}{D'^3 d^2} = \frac{421875 \times 225}{238328 \times 625} = 0,638.$$

DILATATION DES SOLIDES (300, 304 et 305)

XLIX. — On a une barre de 3 mètres d'un métal qui a pour coefficient de dilatation $\frac{1}{754}$; une autre barre de 5 mètres, d'un autre métal, se dilate, pour un même nombre de degrés, autant que la première: en trouver le coefficient de dilatation.

Soit k le coefficient de dilatation de cette seconde barre, on a

$$5 \times k = 3 \times \frac{1}{754}, \text{ d'où } k = \frac{3}{3770}.$$

L. — On veut faire avec de l'acier et du laiton un pendule compensateur dont la longueur constante soit de $0^m,50$. On sait que le coefficient de dilatation de l'acier employé à cet usage est de 0,000010788, et celui du laiton de 0,000018782. On demande quelle disposition on devra donner à ce pendule et les longueurs des barres d'acier et de laiton pour que la compensation ait lieu.

Pour satisfaire aux conditions de ce problème, il faut : 1° que la tige du pendule soit formée d'un système de barres de laiton et d'acier disposées de manière que leur dilatation se produise en sens contraires ; 2° que les longueurs respectives du laiton et de l'acier soient en raison inverse de leurs coefficients de dilatation (307). On satisfait à ces conditions en disposant le pendule comme on l'a déjà vu (fig. 265).

En représentant par x la longueur totale des barres d'acier, et par y celle des barres de laiton, on a, d'après l'équation [1] du paragraphe 307, $x - y = 50^c$ [1].

De plus, les longueurs x et y devant être en raison inverse des coefficients, on a

$$\frac{x}{y} = \frac{18782}{10788} \quad [2].$$

Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = 1^m,1747$, et $y = 0^m,6747$.

LI. — Un aréomètre de Fahrenheit pèse 80^{gr}. Lorsqu'il est chargé de 45^{gr}, il affleure dans un liquide dont la température est de 20°, et dont la densité à la même température est 1,5. On demande le volume à 0° de la portion immergée de l'instrument.

Le poids du liquide déplacé est 125^{gr}, et son volume, à 20°, est $\frac{P}{D} = \frac{125}{1,5}$.

Tel est donc, à cette température, le volume de la portion immergée ; d'où le volume à 0° est (304) $\frac{125}{1,5} \times \frac{1}{1 + 0,00002584 \times 20} = 83^{cc},290$,

0,00002584 étant le coefficient de dilatation cubique du verre.

LII. — La dilatation du fer pour chaque degré d'élévation de température étant de 0,0000122 de la longueur mesurée à zéro, quelle sera, à 60 degrés, la surface d'un disque circulaire de tôle, qui, à zéro, a $2^m,75$ de diamètre ?

$$S = \pi R^2 (1 + kt)^2 = 3,1416 \times (1^m,375)^2 (1 + 0,0000122 \times 60)^2 = 5^{m.c.},94^{d.c.}.$$

LIII. — Une règle de platine de 2 mètres de longueur est divisée, à l'une de ses extrémités, en quarts de millimètre : une règle de cuivre de $1^m,950$ étant appliquée dessus, à zéro, en diffère de $0^m,050$, c'est-à-dire de 200 divisions de la règle de platine. On demande quelle est la température commune aux deux règles lorsqu'elles diffèrent de 164 divisions de la règle de platine, le coefficient de dilatation du platine étant 0,000008842, et celui du cuivre, 0,000017182.

La longueur de la règle de platine, qui est de 8000 divisions à zéro, est, à t degrés

$$8000\,(1 + 0,000008842 \times t) \quad (304).$$

La règle de cuivre, qui vaut 7800 divisions à zéro, vaut, à t degrés,

$$7800\,(1 + 0,000017182 \times t).$$

Enfin les 164 divisions apparentes équivalent en réalité à

$164\,(1 + 0,000008842 \times t)$. On a donc

$$8000\,(1 + 0,000008842 \times t) - 7800\,(1 + 0,000017182 \times t) = 164\,(1 + 0,000008842 \times t),$$

d'où l'on tire $t = \frac{36}{0,0647337} = 556°$.

LIV. — Le rapport entre le poids spécifique du cuivre à zéro et celui de l'eau à 4° est 8,88. Le coefficient de dilatation cubique du cuivre est $\frac{1}{58200}$, et la fraction qui représente la dilatation totale de l'eau, entre 4 et 15 degrés, est $\frac{1}{1360}$. Cela posé, on demande quel est, à 15 degrés, le rapport des poids spécifiques de ces deux corps.

L'eau pesant 1 à 4°, à 15° elle pèse $\frac{1}{1+\frac{11}{1360}}$ (305, prob. V).

A zéro, le cuivre pèse 8,88 ; à 15°, il pèse $\frac{8,88}{1+\frac{15}{58200}}$. Donc le poids spécifique du cuivre à 15° est $\frac{8,88}{1+\frac{15}{58200}} : \frac{1}{1+\frac{11}{1360}} = \frac{8,88 \times 58200}{58215} \times \frac{1371}{1360} = 8,94.$

LV. — De combien s'allongera, en passant de — 15 à + 30 degrés, un fil de fer de 170 kilomètres ? Le coefficient de dilatation du fer est $\frac{1}{81900}$. — Al. = 93m,4.

DILATATION DES LIQUIDES (311 à 318)

LVI. — Le poids spécifique du mercure étant 13,59 à zéro, on demande quel est, à 85°, le volume de 30 kilogrammes de ce métal. On prendra pour coefficient de dilatation du mercure $\frac{1}{5550}$.

Le volume à zéro est $\frac{P}{D} = \frac{30}{13,59}$; d'où le volume à 85° est

$$\frac{30}{13,59}\left(1+\frac{1}{5550}\times 85\right) = 2^{\text{lit.}},241.$$

LVII. — Les hauteurs de deux baromètres A et B ont été observées, l'une à — 10°, l'autre à + 15° ; on demande quelle correction il faut leur faire subir pour les ramener l'une et l'autre à ce qu'elles eussent été à la température de zéro, sachant que le coefficient de dilatation cubique du mercure est $\frac{1}{5550}$. On supposera A haut de 737 millimètres, et B de 763.

Cette question se résout au moyen de la formule $h = \frac{H}{1+Dt}$ (316), en prenant t avec le signe + pour les températures au-dessus de zéro, et avec le signe — pour les températures au-dessous. De cette formule on tire, pour le baromètre A, $h = 737 \times \frac{5550}{5550-10} = 738^{\text{mm}},3$; et pour le baromètre B,

$$h = 763 \times \frac{5550}{5550+15} = 760^{\text{mm}},9.$$

LVIII. — Dans un thermomètre à mercure, on sait que chaque division est $\frac{1}{4500}$ de la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation. Cela posé, si l'on

vide un semblable thermomètre et qu'on y introduise jusqu'au zéro, dans la glace fondante, un liquide dont le coefficient de dilatation absolue soit $\frac{1}{2000}$, on demande jusqu'à quelle division s'élèvera ce liquide à 20°, le coefficient de dilatation cubique du verre étant $\frac{1}{38700}$.

Le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre étant $\frac{1}{6480}$, celui du liquide donné est $\frac{1}{2000} - \frac{1}{38700} = \frac{367}{774000}$. Or, la hauteur h et la hauteur 20 qu'atteignent respectivement ce liquide et le mercure dans la tige du thermomètre étant évidemment proportionnelles aux dilatations apparentes, on a

$$\frac{h}{20} = \frac{367}{774000} : \frac{1}{6480}, \quad \text{d'où} \quad h = 61^\circ,45.$$

LIX. — Une colonne d'eau de $1^m,55$ de hauteur, et une colonne d'un autre liquide de $3^m,17$ de hauteur, se font équilibre dans les branches d'un siphon, la température des deux liquides étant 4 degrés; on demande quelle est la densité du second liquide par rapport à l'eau, et quelle serait la hauteur à laquelle il s'élèverait si sa température était portée à 25 degrés, celle de l'eau restant 4°, et le coefficient de dilatation absolue du liquide étant $\frac{1}{6000}$.

1° Les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre étant en raison inverse des densités (91), on a $1^m,55 \times 1 = 3^m,17 \times d$, d'où $d = 0,4889$, à 4°.

2° En représentant par h la hauteur du même liquide à 25 degrés, par d sa densité à 4 degrés, et par d' sa densité à 25 degrés, on a $3^m,17 \times d = h \times d'$ [1]; or $d' = \frac{d}{1 + \frac{1}{6000} \times 25}$ (305, prob. V). Portant cette valeur dans l'égalité [1], il vient

$$3^m,17 = \frac{h}{1 + \frac{25}{6000}}, \quad \text{d'où} \quad h = 3^m,183.$$

LX. — Un tube de verre cylindrique, fermé à la partie inférieure et lesté avec du mercure, s'enfonce des $\frac{3}{4}$ de sa longueur dans de l'eau à 4°; on demande de combien il plongerait dans de l'eau à 20°. On sait que de 4 à 20 degrés, l'eau se dilate de 0,00179 de son volume, et l'on néglige la dilatation du verre de 4 à 20 degrés.

La densité de l'eau à 4° étant 1, à 20° elle sera en raison inverse du volume qu'a pris l'eau, c'est-à-dire $\frac{1}{1,00179}$. Or, la portion immergée du tube étant en raison inverse de la densité, on a $\frac{x}{\frac{3}{4}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{1,00179}\right)}$, d'où $x = 0,7513$.

LXI. — Un tube capillaire étant divisé en 180 parties d'égale capacité, on trouve qu'une colonne de mercure occupant 25 de ces divisions pèse $1^{gr},2$ à zéro. Cela posé, voulant faire de ce tube un thermomètre, on demande le rayon intérieur du réservoir sphérique qu'on doit lui souder pour que ses 180 divisions comprennent 150 degrés centigrades.

Puisque 25 divisions du tube contiennent $1^{gr},2$ de mercure, une seule division contient $\frac{1^{gr},2}{25}$, et les 180 divisions contiennent $\frac{1,2 \times 180}{25} = 8^{gr},64$. Ces 180 divisions devant comprendre 150 degrés, il s'ensuit que le poids de mercure correspondant à un seul degré est $\frac{8^{gr},64}{150}$. Mais la dilatation correspondante à un degré n'étant autre que la dilatation apparente du mercure dans le verre (311), le poids $\frac{8^{gr},64}{150}$ doit être $\frac{1}{6480}$ du poids du mercure contenu dans le réservoir, poids égal à $\frac{4\pi R^3 \times 13,596}{3}$, R étant le rayon du réservoir, et le poids spécifique du mercure étant 13,596; donc on a $\frac{4\pi R^3 \times 13,596}{3} \times \frac{1}{6480} = \frac{8,64}{150}$; d'où $R = 1^c,55$.

DILATATION DES GAZ (320 à 327)

LXII. — On a renfermé un baromètre dans un large tube qu'on a ensuite fermé à la lampe. La température du tube, au moment de sa fermeture, est 13°, et la hauteur du baromètre, 76. On demande, à 0,001 près, à quelle hauteur s'élèvera le mercure dans le baromètre quand la température de l'air dans le tube sera de 30°.

En ne tenant d'abord compte que de la dilatation du mercure dans le tube barométrique en passant de 13° à 30°, on a $h = \frac{76\left(1 + \frac{30}{5550}\right)}{1 + \frac{13}{5550}} = \frac{76 \times 5580}{5563}$; mais comme dans le tube fermé la force élastique de l'air augmente dans le rapport de $1 + 13\alpha$ à $1 + 30\alpha$, la hauteur barométrique doit augmenter dans le même rapport; donc enfin on a $h = \frac{76 \times 5580\,(1 + 30\alpha)}{5563\,(1 + 13\alpha)} = 80^c,771$.

LXIII. — Un ballon de verre d'une capacité de 5 litres à 0° est rempli d'acide carbonique à 0° et à la pression 76. On chauffe à 100° après l'avoir ouvert pour permettre la sortie du gaz. La pression étant alors 75, on demande le poids de l'acide carbonique sorti du ballon.

Le coefficient de dilatation de l'acide carbonique est 0,00367; la dilatation cubique du verre $\frac{1}{38700}$; 1 litre d'air à 0° et à la pression 76 pèse $1^{gr},293$; et enfin la densité de l'acide carbonique est 1,5.

A 100° et à la pression 75, le volume de l'acide carbonique devient

$$\frac{5\,(1 + 0,00367 \times 100)\,76}{75} = 6^{lit.},926.$$

A la même température, le volume du ballon est $5\left(1 + \frac{100}{38700}\right) = 5^{lit.},013$.

Donc le volume du gaz sorti est $6,926 - 5,013 = 1^{lit.},913$.

Pour avoir le poids de ce gaz, sachant que les 5 litres d'acide carbonique à 0° et à 76 pèsent $1^{gr},293 \times 5 \times 1,5 = 9^{gr},697$, et que, par suite, les $6^{lit.},926$ à 100° et à 75 pèsent autant, on posera la proportion $\frac{x}{9^{gr},697} = \frac{1^{lit.},913}{6^{lit.},926}$, d'où $x = 2^{gr},673$.

LXIV. — Une vessie à parois flexibles contient 4 litres d'air à 30° et à la pression 76. La pression atmosphérique restant la même, on demande ce que de-

viendra le volume d'air si l'on descend la vessie à une profondeur de 100 mètres dans un lac dont la température est de 4°.

Une colonne d'eau de $10^{m},33$, à 4°, représentant une atmosphère (144), on convertit 100 mètres d'eau en atmosphères en divisant 100 par $10^{m},33$, ce qui donne pour quotient $9^{at.},68$. La vessie, au fond de l'eau, est donc soumise à une pression de $10^{at.},68$. Le problème prend donc cette forme : on a 4 litres d'air à 30° et à $1^{at.}$ de pression, quel en sera le volume à 4° et $10^{at.},68$?

$$\text{Donc (320, prob. III) } V = \frac{4(1+0,00367\times 4)}{1+0,00367\times 30}\times\frac{1}{10,68} = 0^{lit.},342.$$

LXV. — Dans un ballon de verre dont la capacité à 0° est 250 c. cubes, on introduit une certaine quantité d'air sec capable d'occuper 25 c. cubes à 0° et à la pression 76. Ayant fermé le ballon et chauffé à 100°, on demande la pression intérieure.

Le coefficient de dilatation de l'air étant 0,00367, et la dilatation cubique du verre $\frac{1}{38700}$, à 100° la capacité du ballon est $250\left(1+\frac{100}{38700}\right)=\frac{250\times 388}{387}$.

A 100° et à la pression 76, le volume d'air libre serait $25(1+0,00367\times 100)=25\times 1,367$; tandis que son volume réel est $\frac{250\times 388}{387}$ à une pression inconnue x. Or, au volume $25\times 1,367$ correspond la pression 76 ;

au volume 1, la pression $76\times 25\times 1,367$;

et au volume $\frac{250\times 388}{387}$, la pression $\frac{76\times 25\times 1,367\times 387}{250\times 388}=10^{c.},36$.

LXVI. — Un corps pesé dans l'air, à 0° et à la pression 76, perd $6^{gr},327$ de son poids. On demande : 1° le volume du corps ; 2° sa perte de poids à 15° et à la pression $1^{m},25$. — On sait que la densité de l'air par rapport à l'eau est $\frac{1}{770}$, que son coefficient de dilatation est 0,00367, et l'on néglige la dilatation du corps.

1° Un décimètre cube d'eau pesant 1000^{gr}, le même volume d'air, à 0° et à 76, pèse $\frac{1000}{770}=\frac{100}{77}$. Donc le volume d'air déplacé, et par suite le volume du corps, est $6^{gr},327 : \frac{100}{77}=\frac{6,327\times 77}{100}=4^{dec.\ cub.},872$.

2° Pour avoir la perte de poids à 15° et à la pression 125^{c}, il faut chercher le poids de $4^{lit.},872$ d'air à cette température et à cette pression. Or ce poids est $\frac{100}{77}\times\frac{4,872\times 125}{(1+0,00367\times 15)76}=9^{gr},86$. Telle est donc la perte de poids cherchée.

LXVII. — A quelle température un litre d'air sec pèse-t-il 1 gramme, sous la pression $0^{m},77$, le coefficient de dilatation de l'air étant 0,00367, et le poids d'un litre d'air sec, à 0° et à la pression $0^{m},76$, étant $1^{gr},293$?

$$\text{On a } \frac{1,293\times 77}{(1+0,00367\times t)76}=1^{gr}, \text{ d'où } t=84°.$$

LXVIII. — Quelle est, à $10°,8$, la perte de poids, dans l'air, d'un corps dont le volume à cette température est 5182 m. cubes ; et quelle serait, à $25°,13$, la perte de poids du même corps, son coefficient de dilatation étant $\frac{1}{2400}$?

$$\text{A } 10°,8\text{, la perte de poids est } \frac{1^{gr},293\times 1000\times 5182}{1+0,00367\times 10,8}=6445^{k},1.$$

A 25°,13, le volume du corps est $\dfrac{5182\left(1+\dfrac{3\times 25,13}{2400}\right)}{1+\dfrac{3\times 10,8}{2400}}$, et, par suite, sa perte de poids est $\dfrac{1^{gr},293\times 1000\times 5182\left(1+\dfrac{3\times 25,13}{2400}\right)}{(1+0,00367\times 25,13)\left(1+\dfrac{3\times 10,8}{2400}\right)}=6242^{k},947.$

DENSITÉS DES GAZ (327 à 330)

LXIX. — Un ballon vide pèse $150^{gr},475$; plein d'air, il pèse $160^{gr},158$; plein d'un autre gaz, $162^{gr},235$. 1° La pression étant invariable, on demande la densité de ce gaz par rapport à l'air; 2° quelle correction on aurait eu à faire si la pression avait été $0^{m},75$ pendant la pesée de l'air, et $0^{m},77$ pendant la pesée du gaz.

1° Poids de l'air $=160^{gr},158-150^{gr},475=9^{gr},683$; poids du gaz $=162^{gr},235-150,475=11^{gr},760$; d'où la densité du gaz $=\dfrac{11,760}{9,683}=1,2145$.

2° La correction à faire est de ramener le poids de l'air et celui du gaz à la pression $0^{m},76$. Pour cela, le poids de l'air étant $9^{gr},683$ à la pression $0^{m},75$, il est $\dfrac{9^{gr},683}{75}$ à la pression 1°, et $\dfrac{9^{gr},683\times 76}{75}$ à la pression 76. On trouvera de même que le poids du gaz à la pression 76 est $\dfrac{11,760\times 76}{77}$. Donc la densité cherchée est $\dfrac{11,760\times 76}{77}:\dfrac{9,683\times 76}{75}=\dfrac{11,760\times 75}{9,683\times 77}=1,183$.

LXX. — Un ballon vide pèse $137^{gr},435$; plein d'air, il pèse $145^{gr},237$; plein d'un autre gaz, $152^{gr},118$. On demande : 1° la densité du gaz par rapport à l'air, lorsque la pression et la température sont restées invariables; 2° la même densité dans le cas où la pression aurait été de 75 centimètres pendant la pesée de l'air, et de 77 centimètres pendant la pesée de l'autre gaz; 3° quel genre de correction aurait-il fallu faire, si la température avait été de 8 degrés pendant la pesée de l'air, et de 11 degrés pendant celle du gaz ?

1° $145,237-137,435=7^{gr},802$; $152,118-137,435=14^{gr},683$; densité du gaz $=\dfrac{14,683}{7,802}=1,8819$.

2° Le poids de l'air à 75° de pression étant $7^{gr},802$, à la pression 76° il est $\dfrac{7,802\times 76}{75}$; celui du gaz, à la pression 76, est $\dfrac{14,683\times 76}{77}$; donc la densité du gaz, dans le second cas, est $\dfrac{14,683\times 75}{7,802\times 77}=1,833$.

3° Il faudrait ramener le poids des deux gaz à zéro, en multipliant le poids de l'air par $1+0,00367\times 8$, et celui du gaz par $1\times 0,00367\times 11$.

CHALEURS SPÉCIFIQUES (392 à 397)

LXXI. — Dans $25^{k},45$ d'eau à 12°,5, on met $6^{k},17$ d'un corps à la température de 80 degrés; le mélange prend une température de 14°,17; on demande quelle est la chaleur spécifique de ce corps.

En représentant par c la chaleur spécifique demandée, d'après la formule $mc(t'-t)$ (392), la chaleur perdue par le corps chaud est représentée par

$6^k,17\,(80-14,17)\,c$, et celle absorbée par l'eau l'est par $25^k,45\,(14,17-12,5)$; or ces deux quantités de chaleur étant nécessairement égales, on a

$$6^k,17\,(80-14,17)\,c = 25^k,45\,(14,17-12,5)\,;\quad \text{d'où}\quad c = 0,104.$$

LXXII. — La capacité de l'or pour la chaleur est 0,0298, celle de l'eau étant prise pour unité; on demande combien il faudra de ce métal à 45 degrés pour élever de 12°,3 à 15°,7 la température de $1^k,000^{gr},58$ d'eau.

Soit x le poids cherché, en kilogrammes; d'après la formule $m\,(t'-t)\,c$, la chaleur cédée par l'or, en se refroidissant de 45 degrés à 15°,7, est $x\,(45-15,7)\,0,0298$, et celle absorbée par l'eau, en s'échauffant de 12°,3 à 15°,7, est $1^k,00058\,(15,7-12,3)$. Or, la quantité de chaleur cédée par l'or étant nécessairement égale à celle qui est absorbée par l'eau, on a

$$x\,(45-15,7)\,0,0298 = 1^k,00058\,(15,7-12,3),\quad \text{d'où}\quad x = 3^k,896.$$

LXXIII. — On a une sphère de platine de $0^m,05$ de rayon à 95 degrés, on la plonge dans 2 litres d'eau à 4 degrés; on demande la température de l'eau lorsque l'équilibre s'est établi. La capacité calorifique du platine est 0,0324; son coefficient de dilatation linéaire est 0,000008842, et sa densité 22,07.

Soient V' le volume de la sphère à 95 degrés, V le volume à zéro, et P son poids; on a $V' = V\,(1+3Kt)$, d'où $V = \dfrac{V'}{1+3Kt}$;

$$\text{Or}\quad V' = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4\times 3,141592\times 125^{c.cub.}}{3} = 523^{c.cub.},598\,;$$

$$\text{d'où}\quad V = \frac{523,598}{1+0,000008842\times 3\times 95} = 522^{c.cub.},282,\ \text{et}\quad P = 11^k,526^{gr}.$$

Par conséquent, la masse de platine, en se refroidissant de 95 à x degrés, cède, d'après la formule $m\,(t'-t)\,c$, une quantité de chaleur égale à $11^k,526\times(95-x)\times 0,0324$, et les 2 litres d'eau, en s'échauffant de 4 à x degrés, absorbent $2\times(x-4)$.

$$\text{On a donc}\quad 2\,(x-4) = 11,526\times 0,0324\,(95-x)\,;\quad \text{d'où}\quad x = 18^\circ,3.$$

LXXIV. — Calculer la puissance calorifique du stère de bois qui pèse 400 kilogrammes, et qui se compose d'un mélange de bois de chêne et de bois de sapin, sachant que le chêne pèse 450 kilogrammes le mètre cube, et le sapin 325 kilogrammes; et que la quantité d'eau dont la température est élevée de 0 degré à 100 degrés par la combustion d'un mètre cube de bois, est de 12150^k pour le chêne, et de 8775^k pour le sapin.

Soient x le volume du chêne qui entre dans le stère, et y le volume du sapin, on a $x+y=1$ [1].

Un mètre cube de chêne pesant 450^k, le volume x pèse $450\,x$; de même le volume y de sapin pèse $325\,y$; on a donc $450\,x+325\,y=400$ [2].

$$\text{Résolvant les équations [1] et [2], on trouve}\quad x = \frac{3}{5},\ \text{et}\quad y = \frac{2}{5}.$$

Or la puissance calorifique d'un mètre cube de chêne étant 12150, celle du volume x est $12150\times\frac{3}{5}$, de même celle de y est $8775\times\frac{2}{5}$; donc la puissance calorifique demandée est $\dfrac{12150\times 3+8775\times 2}{5} = 10800$.

LXXV. — La chaleur spécifique du sulfure de cuivre est 0,1212; celle du sulfure d'argent 0,0746. Un mélange de ces deux corps, porté à 40 degrés et plongé dans 6 kilogrammes d'eau à 7,67 degrés, en élève la température à 10 degrés. Combien ce mélange contient-il de chaque sulfure?

$$0,1212\times 30\,x + 0,0746\times 30\,(5-x) = 6\,(10-7,67),\ \text{d'où}\quad x = 2^k,\ \text{et}\quad 5-x = 3^k.$$

CHALEURS LATENTES (400 à 404)

LXXVI. — Combien faut-il de kilogrammes de glace à zéro pour amener à 10 degrés centigrades l'eau contenue dans un bassin à bord circulaire et à fond horizontal, dont la circonférence supérieure est de $8^m,30$, la circonférence inférieure de $6^m,15$, et la hauteur de $1^m,76$; ce bassin étant rempli d'eau à moitié de sa hauteur, et la température de l'eau étant de 30 degrés?

Soient R le rayon OB (fig. 819) de la base supérieure, r le rayon CD de la base inférieure, r' le rayon IE, et h la hauteur IC du liquide contenu dans le bassin.

$$\text{On a } R = \frac{8,30}{2\pi} = 1^m,3210, \quad r = \frac{6,15}{2\pi} = 0^m,9788, \quad IC = 0^m,88,$$

$$\text{et } r' = \frac{R+r}{2} = 1^m,1499.$$

Cela posé, le volume V du liquide étant celui d'un tronc de cône dont la hauteur est h, et dont les rayons des bases sont r et r', on a, d'après un théorème connu de géométrie,

$$V = \frac{\pi h}{3}(r'^2 + r^2 + rr') = 3^{m.cub.},138,605,$$

volume qui représente un poids d'eau de $3\,138^k,605^{gr}$.

Fig. 819.

Soit actuellement x le poids de glace nécessaire pour refroidir cette masse d'eau de 30 à 10 degrés. Comme on a vu (401) qu'en se fondant, 1 kilogramme de glace absorbe 79 unités de chaleur, x kilogrammes de glace absorbent $79x$, pour donner x kilogrammes d'eau à zéro. Or, d'après les données de la question, cette dernière masse, devant elle-même être portée à 10 degrés, absorbe, en outre, une quantité de chaleur égale à $10x$ (392). D'un autre côté, la chaleur cédée par l'eau est égale à $3\,138^k,605 \times (30-10)$, ou 62772,1. On a donc l'égalité

$$79x + 10x = 62772,1, \quad \text{d'où} \quad x = 705^k,304.$$

LXXVII. — Chercher combien il faut de kilogrammes de vapeur d'eau pour porter un bain de 246 kilogrammes d'eau de 13 à 28 degrés, sachant que la chaleur latente de la vapeur d'eau est 540.

Soit x le poids de vapeur demandé; 1 kilogramme de vapeur qui se condense pour donner 1 kilogramme d'eau à 100 degrés, cédant 540 unités de chaleur, x kilogrammes de vapeur cèdent $540 \times x$; de plus, les x kilogrammes d'eau formés, se refroidissant ensuite de 100 degrés à 28, cèdent eux-mêmes un nombre d'unités représenté par $(100-28)\,x$. Or, les 246 kilogrammes d'eau qui constituent le bain dans lequel la vapeur se condense, s'échauffant alors de 13 à 28 degrés, absorbent une quantité de chaleur égale à $246\,(28-13)$. On a donc l'équation

$$540x + (100-28)\,x = 246\,(28-13), \quad \text{d'où} \quad x = 6^k,029^{gr}.$$

LXXVIII. — Une cuve cylindrique, à fond plat et horizontal, a $1^m,30$ de diamètre et $0^m,75$ de hauteur intérieurement; elle est à moitié pleine d'eau à 4 degrés, et l'on chauffe ce liquide en y faisant arriver de la vapeur à 100 degrés fournie par $5^k,250$ d'eau. On demande quelle sera la température du bain ainsi chauffé et quel en sera le volume. On négligera la température du vase, et on prendra pour coefficient de dilatation de l'eau $\frac{1}{2200}$.

$$\text{Le volume de l'eau} = \pi R^2 \times \frac{H}{2} = 3,1416 \times (0^m,65)^2 \times \frac{0^m,75}{2} = 497^{lit.},747.$$

θ étant la température finale, et 540 la chaleur de vaporisation de l'eau, on a donc (404, prob. V),

$$5^k,250 \times 540 + 5,250(100-\theta) = 497,747(\theta-4)\text{ ; d'où } \theta = 10^\circ,6.$$

Le volume total d'eau après la condensation est, à 4 degrés,

$$497^{lit.},747 + 5^{lit.},250 = 502^{lit.},997.$$

Donc, à 10°,6, c'est-à-dire lorsque la température s'élève de 6°,6, le volume devient

$$502^{lit.},997\left(1+\frac{6^\circ,6}{2200}\right) = 504^{lit.},509.$$

LXXIX. — La chaleur latente de la vapeur d'eau étant supposée égale à 540, on demande à quelle température on élèvera 20 litres d'eau à 4 degrés, en y condensant 1 kilogramme de vapeur à 100 degrés et à la pression $0^m,76$.

Soit θ la température finale, la chaleur cédée par 1 kilogramme de vapeur sera 540, et celle cédée par l'eau, résultant de la condensation, sera $100-\theta$; on aura donc $540+100-\theta = 20(\theta-4)$, d'où $\theta = 34^\circ,28$.

LXXX. — Combien faut-il de kilogr. de glace à zéro pour liquéfier et ramener à zéro 25 kilogr. de vapeur, dégagés d'un appareil où le thermomètre marque 100°, le baromètre marquant $0^m,76$? La chaleur de fusion de la glace est 79.

On a $79x = 25 \times 540 + 25 \times 100$, d'où $x = 202^k,532^{gr}$.

LXXXI. — 11 kilogr. de glace à zéro ont été mélangés avec P kilogr. d'eau à 45°; le mélange a pris la température de 12°; on demande le poids P.

On a $P(45-12) = 79 \times 11 + 12 \times 11$, d'où $P = 30^k,333^{gr}$.

LXXXII. — Dans quelles proportions faut-il partager 1 kilogramme d'eau à 50 degrés pour que la chaleur que l'une de ses parties abandonnerait en passant à l'état de glace à zéro fût suffisante pour transformer l'autre en vapeur à 100 degrés à la pression 760^{mm}? — Chaleur de fusion de la glace 79,25, et chaleur de vaporisation de l'eau 535. On a

$$50x + 79,25x = (1-x)50 + (1-x)535\text{ ; d'où } x = 0^k,819^{gr}, \text{ et } 1-x = 0^k,181^{gr}.$$

LXXXIII. — On sait (338) que, dans des conditions convenablement choisies, un corps peut rester liquide à des températures inférieures à celle de sa solidification normale. Cela posé, on demande de combien de degrés au-dessous du point de sa fusion il faut refroidir du phosphore liquide pour que, par sa solidification brusque et complète, il remonte au point de fusion. — Chaleur de fusion du phosphore 5,4; chaleur spécifique dans le voisinage du point de fusion 0,20.

On a $5,4 = t \times 0,2$, d'où $t = 27^\circ$.

LXXXIV. — On a abaissé du phosphore liquide jusqu'à 30 degrés; à ce moment on y détermine un commencement de solidification. On demande si la solidification sera complète, et, si elle ne l'est pas, quelle sera la portion du poids total qui se solidifiera? — Le phosphore fond à 44°,2, sa chaleur de fusion est 5,4, et sa chaleur spécifique, à l'état solide ou liquide, dans le voisinage de la fusion, est 0,2.

On a $(44,2-30) \times 0,2 = 5,4x$, d'où $x = 0,525$.

VAPEURS (372, 373 et 389)

LXXXV. — Dans un vase vide, d'une capacité de $2^{lit.},02$, on a introduit d'abord 1 litre d'air sec sous la pression $0^m,76$, puis de l'eau en quantité telle, qu'il en reste définitivement 20 centimètres cubes à l'état liquide. On demande la pression intérieure, en supposant que la température soit de 30° au moment de l'expérience, et que la tension maximum de la vapeur d'eau, à cette température, soit de $0^m,031$.

La capacité du ballon étant réduite des 20 centimètres d'eau qui y restent

à l'état liquide, elle n'est en réalité que $2^{\text{lit.}},02$, moins $0^{\text{lit.}},020$ ou 2 litres. Le volume d'air se trouve donc doublé, et, par conséquent, sa tension, qui était $0^{\text{m}},76$, n'est plus que $0^{\text{m}},38$. Ajoutant à cette pression celle de la vapeur, qui est $0^{\text{m}},031$, on a pour la pression intérieure totale $0^{\text{m}},411$.

LXXXVI.— Une certaine quantité d'air pèse $5^{\text{gr}},2$, à la température de 0 degré et sous la pression $0^{\text{m}},76$. On la chauffe à 30° sous la pression $0^{\text{m}},77$, en lui permettant de se saturer de vapeur d'eau. On demande quel sera alors le volume qu'elle occupera. La tension maximum de la vapeur à 30 degrés est de $0^{\text{m}},0315$, et on prendra $1^{\text{gr}},3$ pour poids du litre d'air sec à la température de 0° et sous la pression $0^{\text{m}},76$.

Le poids d'un litre d'air sec étant $1^{\text{gr}},3$, le volume correspondant à $5^{\text{gr}},2$ égale $\frac{5,2}{1,3} = 4$ litres, à 0 degré et à la pression $0^{\text{m}},76$. A 30° il est $4(1+0,00367\times 30)$; lequel, à la pression $0^{\text{m}},77$, devient $\frac{4\times(1+0,00367\times 30)\,76}{77}$, l'air étant sec. Mais lorsque l'air est saturé de vapeur dont la tension est $0^{\text{m}},0315$, c'est cette tension, plus la force élastique de l'air, qui, d'après la deuxième loi des mélanges des gaz et des vapeurs (372), font équilibre à la pression $0^{\text{m}},77$; donc la pression de l'air est $0^{\text{m}},77 - 0^{\text{m}},0315$, et, par conséquent, le volume demandé est

$$\frac{4\times(1+0,00367\times 30)\,76}{77-3,15} = 4^{\text{lit.}},56.$$

LXXXVII. — Le poids d'un litre d'air, à zéro et à la pression $0^{\text{m}},76$, est $1^{\text{gr}},293$, et la densité de la vapeur d'eau prise par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$. Cela posé, on demande quel est, à 30 degrés et à la pression 0,77, le poids d'un mètre cube d'air dont l'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$, la tension maximum de la vapeur à 30 degrés étant $0^{\text{m}},0315$.

Commençons par observer que la tension de la vapeur saturée étant $0^{\text{m}},0315$, cette tension n'est plus que les $\frac{3}{4}$ de $0^{\text{m}},0315$ lorsque la vapeur est à l'état hygrométrique $\frac{3}{4}$. De plus, l'air dont on demande le poids n'est pas, d'après la loi des mélanges (372), à la pression 77, mais à cette pression moins celle de la vapeur, c'est-à-dire à la pression $(0^{\text{m}},77 - \frac{3}{4}\cdot 0^{\text{m}},0315)$.

Le problème revient donc à chercher d'abord le poids d'un mètre cube d'air sec à 30° et à la pression $(0^{\text{m}},77 - \frac{3}{4}\cdot 0^{\text{m}},0315)$, puis celui d'un mètre cube de vapeur à 30° et à la tension $\frac{3}{4}\cdot 0^{\text{m}},0315$, puis à faire la somme des deux poids.

1° A 30° et à la pression $0^{\text{m}},77 - \frac{3}{4}\cdot 0^{\text{m}},0315 = 0^{\text{m}},7464$, 1 mètre cube d'air sec pèse

$$\frac{1293^{\text{gr}}\times 74,64}{(1+30\alpha)\,76}\ [1];$$

2° A 30° et à la pression $\frac{3}{4}.0^{\text{m}},0315$, 1 mètre cube de vapeur pèse

$$\frac{1293^{\text{gr}}\times 3^{\text{c}},15\times 5\times 3}{(1+30\alpha)\,76\times 8\times 4}\ [2].$$

Faisant la somme des formules [1] et [2], on a, pour le poids demandé,

$$\frac{1293^{\text{gr}}}{(1+30\alpha)\,76}\left[74^{\text{c}},64 + \frac{3^{\text{c}},15\times 5\times 3}{8\times 4}\right] = 1166^{\text{gr}},6.$$

LXXXVIII. — On a 3 litres d'air à 30° et à la pression 76, dont l'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$. On demande ce que deviendra ce volume d'air, à la même température et à la même pression, si on l'agite avec de l'acide sulfurique concentré, et quel sera l'accroissement de poids que prendra l'acide.

La tension maximum de la vapeur à 30° est $0^{m},0315$, et la densité de la vapeur par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$.

La tension maximum étant $3^{c},15$, à l'état hygrométrique $\frac{3}{4}$ elle est $\frac{3}{4}$ de $3^{c},15 = 2^{c},36$. D'où les 3 litres d'air humide sont à la pression $76 - 2,36 = 73,64$. Il s'agit donc de chercher ce que deviennent ces 3 litres en passant de la pression 73,64 à la pression 76, ce qui donne pour le volume cherché $\frac{3 \times 73,64}{76} = 2^{lit.},906$.

Quant au poids des 3 litres de vapeur à 30° et à la pression 2,36, il est

$$\frac{1^{gr},293 \times 2,36 \times 5 \times 3}{(1 + 0,00367 \times 30)\,76 \times 8} = 0^{gr},067.$$

C'est donc là l'accroissement de poids que prendra l'acide sulfurique.

LXXXIX. — Étant donnés $6^{lit.},85$ d'air saturé de vapeur d'eau à 11° et sous la pression $0^{m},768$, on demande quel sera le volume de cet air desséché à la température de 15 degrés et à la pression $0^{m},750$. — On sait qu'à 11 degrés la tension de la vapeur à l'état de saturation est $0^{m},010074$.

La pression primitive du gaz est $768 - 10,074 = 757,926$. Donc son volume à la pression 750 et à 11° est $\frac{6^{lit.},85 \times 757,926}{750}$; d'où, à zéro et à la pression 750, son volume est $\frac{6^{lit.},85 \times 757,926}{(1 + 0,00367 \times 11)\,750}$. Donc, enfin, à 15° et à la pression 750, le volume est

$$\frac{6^{lit.},85\,(1 + 0,00367 \times 15)\,757,926}{(1 + 0,00367 \times 11)\,750} = 7^{lit.},02.$$

XC. — Dans un tube en U contenant de la ponce sulfurique, on fait passer 1 mètre cube d'air à la température de 15 degrés. Le tube en U, pesé avant et après l'expérience, accuse, après le passage de l'air, un excès de poids de $3^{gr},95$; on demande l'état hygrométrique de l'air. — On sait que la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$, et que la tension maximum à 15 degrés est $12^{mill.},69$.

Le poids d'un mètre cube d'air, à zéro et à la pression $760^{mill.}$, étant 1293^{gr}, à 15° et à la pression $12^{mill.},69$, son poids est $\frac{1293^{gr} \times 12,69}{(1 + 15\alpha)\,760}$; donc le poids d'un mètre cube de vapeur saturée, à 15 degrés, est $\frac{1293^{gr} \times 12,69 \times 5}{(1 + 15\alpha)\,760 \times 8} = 12^{gr},78$.

Mais le poids de la vapeur contenue dans l'air n'est que de $3^{gr},95$; donc, en représentant par E l'état hygrométrique cherché, on a (380) $E = \frac{3,95}{12,78} = 0,309$.

XCI. — Une marmite de Papin contient $3^{k},25$ d'eau à 142 degrés. En ouvrant la soupape, une portion de l'eau se vaporise, et l'autre se refroidit à 100 degrés. On demande le poids de vapeur produit, la chaleur de vaporisation étant 540.

Soit x le poids de la vapeur. La chaleur passée à l'état latent sera $540x$; et celle perdue par le refroidissement de $3^{k},25$ d'eau de 142° à 100° sera $3^{k},25 \times 42$. Donc on a $540x = 3^{k},25 \times 42$, d'où $x = 0^{k},253^{gr}$.

XCII. — Calculer le volume d'air qui, à l'état hygrométrique 0,70, contient 600 grammes de vapeur à 30 degrés, la tension maximum à 30 degrés étant $31^{mm},548$, et la densité de la vapeur $\frac{5}{8}$.

Soit x le volume cherché, lequel est le même pour l'air et pour la vapeur. On sait que le poids d'un litre de vapeur à 30° et à l'état hygrométrique 0,7, est $\frac{1^{gr},293 \times 31,548 \times 0,7 \times 5}{(1+0,00367 \times 30)\,760 \times 8}$ (389, probl. II). Or autant de fois le poids 600 grammes contiendra le poids d'un litre, autant le volume demandé contiendra de litres.

Donc $x = 600 : \frac{1^{gr},293 \times 31,548 \times 0,7 \times 5}{(1+0,00367 \times 30)\,760 \times 8} = \frac{600\,(1+0,00367 \times 30)\,760 \times 8}{1,293 \times 31,548 \times 0,7 \times 5}$
$= 28364$ litres.

XCIII. — On demande, à zéro degré et sous la pression $0^{m},760$, le poids d'un volume d'air sec, sachant que ce volume saturé, à 18 degrés et à la pression $0^{m},78$, pèse $16^{gr},25$. — La force élastique de la vapeur d'eau à 18 degrés est $0^{m},01535$, et sa densité égale $\frac{5}{8}$ de celle de l'air.

Pour avoir le volume d'air qui, à l'état de saturation, à 18 degrés et à la pression 780, pèse $16^{gr},25$, cherchons le poids d'un litre d'air saturé dans les mêmes conditions. Ce poids, qui se compose du poids d'un litre d'air sec, plus du poids d'un litre de vapeur, est

$$\frac{1^{gr},293\,(780-15,35)}{(1+0,00367 \times 18)\,760} + \frac{1^{gr},293 \times 15,35 \times 5}{(1+0,00367 \times 18)\,760 \times 8} \quad (373, \text{prob. III}).$$

Réduisant au même dénominateur et simplifiant, on trouve, pour poids d'un litre d'air saturé à 18° et à 780^{mm} de pression, $\frac{1^{gr},293\,(780 \times 8 - 15,35 \times 3)}{(1+0,00367 \times 18)\,760 \times 8}$.

Divisant le poids donné $16^{gr},25$ par le poids d'un litre, on a pour le volume cherché $\frac{16^{gr},25\,(1+0,00367 \times 18)\,760 \times 8}{1^{gr},293\,(780 \times 8 - 15,35 \times 3)}$.

Or c'est ce volume dont on demande le poids à zéro et à 760, quand il ne contient que de l'air sec. On aura donc le poids demandé en multipliant ce volume par $1^{gr},293$, ce qui s'obtient en supprimant ce facteur dans le dénominateur; donc on a pour solution $\frac{16^{gr},25\,(1+0,00367 \times 18)\,760 \times 8}{780 \times 8 - 15,35 \times 3} = 17^{gr}$.

XCIV. — La densité de l'éther liquide à zéro est 0,75; celle de l'éther gazeux rapporté à l'air 2,5. On demande l'épaisseur que doit avoir, à zéro, une couche cylindrique d'éther pour que, transformée en vapeur à 38 degrés, dans un tube de même section et de 1 mètre de long, elle donne une vapeur à la tension de $0^{m},70$. — Le poids du litre d'air sec est $1^{gr},293$, et le coefficient de dilatation des gaz 0,00367; l'éther entre en ébullition à 36 degrés, à la pression $0^{m},76$.

Soient $100^{c.car.}$ la section du tube, et x l'épaisseur de la couche d'éther liquide; son poids, en grammes, est $100 \times x \times 0,75$. Quant à la vapeur, son volume, en litres, est 10, et son poids est $\frac{1^{gr},293 \times 10 \times 2,5 \times 70}{(1+0,00367 \times 38)\,76}$. Égalant ce poids au premier poids $100x \times 0,75$, et résolvant, on trouve $x = 2^{mm},5$.

XCV. — On a refroidi, de 30 à 10 degrés, un volume d'air de 500 litres, saturé d'humidité à la pression 760^{mm}. Quel est le poids de la vapeur condensée, et quel est le volume de l'air refroidi à 10 degrés, à la même pression. — Densité de la vapeur d'eau $\frac{5}{8}$; tension maximum, à 30 degrés $30^{mm},3$, à 10 degrés $9^{mm},43$; poids d'un litre d'air sec $1^{gr},293$; coefficient de dilatation des gaz $\frac{1}{273}$.

Poids de la vapeur condensée $10^{gr},1$; volume de l'air refroidi 484 litres.

OPTIQUE

XCVI. — Voulant comparer l'intensité d'une lampe Carcel à celle d'une bougie, au moyen du photomètre de Rumford (fig. 371, page 441), on trouve que les ombres portées sur l'écran paraissent de même intensité, lorsque, la bougie étant à 2 mètres de l'écran, la lampe en est à 4m,74. Quelle est l'intensité de la lampe, celle de la bougie étant prise pour unité ?

Soit i l'intensité de la lampe à l'unité de distance, à la distance de 4m,74 elle sera $\frac{i}{(4,74)^2}$ (484); de même, celle de la bougie, qui est 1 à l'unité de distance, sera $\frac{1}{4}$ à la distance de 2 mètres. Mais, à ces distances, les deux intensités sont égales; on a donc $\frac{i}{(4,74)^2}=\frac{1}{4}$, d'où $i=\frac{(4,74)^2}{4}=5,617$.

XCVII. — Une lampe et une bougie sont distantes l'une de l'autre de 3m,15, et l'intensité de la lumière de la bougie étant 1, à l'unité de distance, celle de la lampe est 5,6; à quelle distance de la lampe, sur la ligne droite qui joint les deux lumières, doit-on placer un écran, pour qu'il soit également éclairé par l'une et par l'autre, sachant que l'intensité d'une lumière est en raison inverse du carré de la distance ?

Soit x la distance à laquelle l'écran doit être placé de la lampe; sa distance à la bougie sera $3^m,15-x$. L'intensité de la lampe, qui est 5,6 à l'unité de distance, est $\frac{5,6}{x^2}$ à la distance x; et celle de la bougie étant 1 à l'unité de distance, est $\frac{1}{(3,15-x)^2}$ à la distance $3^m,15-x$. Mais alors les intensités sont égales; donc $\frac{5,6}{x^2}=\frac{1}{(3,15-x)^2}$, ou $\left(\frac{3,15-x}{x}\right)^2=\frac{1}{5,6}=\frac{10}{56}=\frac{5}{28}$.

En extrayant la racine, $\frac{3,15-x}{x}=\pm\sqrt{\frac{5}{28}}=\pm 0,422$; d'où l'on déduit les deux valeurs $x'=2^m,21$, et $x''=5^m,45$. La première correspond à un point situé entre les deux lumières; la seconde donne un point situé sur le prolongement de la droite qui les joint.

XCVIII. — Devant un miroir sphérique concave de 0m,95 de rayon, on place, à la distance de 3m,40, un objet BD (fig. 396, page 461) dont la hauteur est de 0m,12; on demande la distance de l'image au miroir et sa grandeur.

Ce problème se résout par la formule $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{2}{R}$, donnée en optique (506), dans laquelle p représente la distance de l'objet au miroir, p' la distance de l'image, et R le rayon de courbure du miroir. D'après l'énoncé, on a, en centimètres, $p=340$, et $R=95$; substituant dans l'équation ci-dessus, il vient

$$\frac{1}{340}+\frac{1}{p'}=\frac{2}{95};\quad \text{d'où}\quad p'=55^c,2.$$

Pour calculer la grandeur db de l'image, il faut se rappeler ce qui a été dit au paragraphe 508, dans lequel on a vu que les triangles BDC et Cdb (fig. 396) étant semblables, on a $\frac{db}{BD}=\frac{Co}{CK}$, d'où $bd=\frac{BD\times Co}{CK}$. Or, par hypothèse,

$$BD=12,\quad CK=p-R=3^m,4-0^m,95=2^m,45;$$

et d'après la valeur de p', on a $Co=CA-Ao=95^c-55^c,2=39^c,8$; donc

$$bd=\frac{12\times 39,8}{245}=1^c,95.$$

XCIX. — Quelle est la hauteur *minima* que doit avoir un miroir plan, placé verticalement, pour qu'une personne se tenant debout devant ce miroir s'y voie par réflexion de la tête aux pieds? Établir la position du miroir.

Soient A le sommet de la tête, B les pieds, O l'œil, et mm' le plan du miroir (fig. 820). On sait que les images des points A et B se font aux points a et b, qui leur sont symétriques (491), et que par suite l'image ab est de même grandeur que l'objet, et la distance ma égale à mA. Or l'œil voyant l'image ab sous l'angle aOb, il suffit que la hauteur du miroir soit égale à la portion de la droite mm' comprise dans cet angle, c'est-à-dire à MM'; mais, dans le triangle Oab, OM étant la moitié de Oa, $MM' = \frac{ab}{2} = \frac{AB}{2}$; donc la hauteur du miroir doit être au moins la moitié de celle de l'objet.

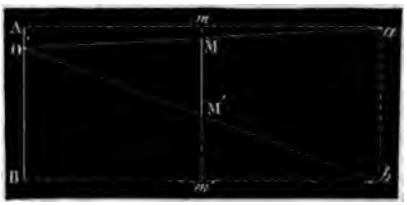


Fig. 820.

Quant à la position du miroir, elle est déterminée par les points où les droites Oa et Ob rencontrent le plan mm'. Le triangle ObB fait voir que Bm' étant la moitié de Bb, $m'M'$ est la moitié de BO; c'est-à-dire que le miroir doit être placé, au-dessus du plan horizontal sur lequel posent les pieds de l'observateur, à une distance égale à la demi-hauteur de l'œil au-dessus du même plan. Dans toute autre position, plus haute ou plus basse, les points A et B ne se trouveraient pas simultanément dans le champ du miroir.

C. — Sur un miroir plan, tournant autour d'un axe vertical, tombe un rayon de lumière horizontale fixe; lorsque le miroir tourne d'un certain angle a, de quel angle tourne, dans le même temps, le rayon réfléchi?

Soient mn la première position du miroir, $m'n'$ la deuxième quand il a tourné d'un angle a, et OD le rayon incident fixe (fig. 821). Si du centre de rotation C, avec un rayon arbitraire, on décrit une circonférence Omn, et que du point O, où elle coupe le rayon incident, on abaisse les cordes OO' et OO'' perpendiculaires sur mn et sur $m'n'$; les points O' et O'' étant les images du point O dans les deux positions du miroir, l'arc $O'O''$ mesure la déviation angulaire de l'image, et, par suite, du rayon réfléchi, tandis que l'arc mm' mesure celle du miroir. Or les deux angles $O'OO''$ et mCm' sont égaux comme ayant les côtés perpendiculaires chacun à chacun; mais l'angle $O'OO''$, qui est inscrit, a pour mesure la moitié de l'arc $O'O''$, et l'angle mCm', qui est un angle au centre, tout l'arc mm'. Donc $O'O''$ est double de mm'; ce qui fait voir que le miroir ayant tourné d'un angle a, le rayon réfléchi a tourné de $2a$.

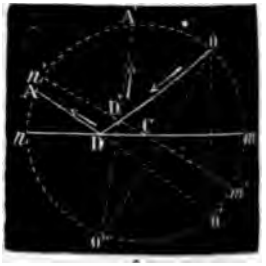


Fig. 821.

FIN DES PROBLÈMES

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE PREMIER

MATIÈRE, FORCES ET MOUVEMENT

Notions générales. 1
Objet de la physique. 1
Matière, corps, atomes, molécules. 1
Masse, trois états des corps. . . . 2
Phénomènes physiques. 3
Lois et théories physiques. 3
Agents physiques, éther, théorie dynamique. 3
Division de la physique. 4

Propriétés générales. 4
Étendue, vernier. 5
Vis micrométrique. 6
* Cathétomètre. 6
Divisibilité, porosité. 8
Volume réel et volume apparent. . 9
Compressibilité. 10
Élasticité. 10
Mobilité, mouvement, repos. . . . 11
Inertie, applications. 12

Forces. 12
Équilibre 13
Caractères, unité et représentation des forces. 13
Résultantes, composantes. 14
Composition et décomp. des forces. 14

Notions sur les mouvements. . . . 16
Mouvement uniforme. 16
Vitesse et loi de ce mouvement. . 16
Mouvement varié. 17
Vitesse et lois du mouvement uniformément accéléré. 17
Proportionnalité des forces aux accélérations. 18
Quantité de mouvement. 18
Force vive, travail mécanique. . 19
Relation entre le travail mécanique et la force vive. 19
Principe général des forces vives. . 20

LIVRE II

PESANTEUR, ATTRACTION UNIVERSELLE, FORCES MOLÉCULAIRES

Attraction universelle, ses lois. . . 21
Pesanteur, verticale, horizontale. . 22
Fil à plomb. 23

Densités et poids. 24
Poids absolu, poids relatif. 24
Centre de gravité, sa détermination. 25
Équilibre des corps pesants. . . . 27
Divers états d'équilibre. 28
Leviers. 29
Balances. 30
Conditions de précision. 31
Conditions de sensibilité. 33
Balances de précision. 35
Méthode des doubles pesées. . . . 38

Lois de la chute des corps. 38
Plan incliné. 40
Machine d'Atwood. 41
Machine de Morin 45
Formules sur la chute des corps. . 47
Causes qui modifient la pesanteur. 48
Mesure de la pesanteur. 49

Pendule. 50
Lois des oscillations du pendule. . 51
Longueur du pendule composé. . 53
Vérification des lois du pendule. . 54
Usages du pendule. 55
Problèmes sur la pesanteur. . . . 56

* *Propriétés particulières*. 57
Élasticité de traction. 57
Id. de torsion et de flexion. 58
Ténacité, adhésion. 59
Ductilité, dureté, trempe. 60

LIVRE III

DES LIQUIDES

Hydrostatique. 61
Caractères généraux des liquides. . 61
Compressibilité des liquides. . . . 61
Principe d'égalité de pression. . . 64
Pression dans les liquides. 66
Pression de haut en bas, ses lois. . 66

Poussée de bas en haut. 66
La pression est indépendante de la forme des vases. 67
Appareil de de Haldat. 68
Appareil de Masson. 69
Pression sur les parois latérales. . 69
Tourniquet hydraulique. 70
Paradoxe hydrostatique. 71

Conditions d'équilibre des liquides. 72
Équilibre dans un seul vase. . . . 72
Id. dans les vases communiquants. 73
Équilibre des liquides superposés. 74
Équilibre de deux liquides hétérog. 74

Applications 76
Presse hydraulique. 76
Niveau d'eau. 78
Niveau à bulle d'air. 79
Cours d'eau, puits artésiens. . . . 79

Corps plongés dans les liquides. . 81
Pression qu'ils supportent. 81
Principe d'Archimède. 82
Détermination des volumes. . . . 83
Équilibre des corps plongés et des corps flottants, métacentre . . 83
Ludion 85
Vessie natatoire, natation. 86

Poids spécifiques des solides. . . . 86
Températures adoptées. 87
Méthode de la balance hydrostatiq. 88
Méthode de l'aréomèt. de Nicholson. 88
Méthode du flacon. 89
Cas des corps solubles dans l'eau. . 90
Table des poids spécif. des solides. 91
Poids spécifiques des liquides . . . 91
Méthode de la balance hydrostatiq. 91
Mét. de l'aréomètre de Fahrenheit. 91
Méthode du flacon. 92
Table des poids spécif. des liquides. 92
Usage des poids spécifiques. 92

Aréomètres à volume variable. . . 93
Aréomètre de Baumé. 93
Alcoomètre de Gay-Lussac. . . . 94
Pèse-sels 96
Densimètres. 96

* *Capillarité.* 97
Ses lois dans les tubes. 98
Ses lois entre deux lames. 98
Attractions et répulsions dues à la capillarité 99
Cause de la courbure des surfaces. 99
Influence de cette courbure. . . . 100
Effets divers de la capillarité. . . 101

* *Diffusion, osmose, absorption et dialyse.* 101
Diffusion des liquides. 101
Lois de la diffusibilité. 102
Osmose, endosmose et exosmose. . 102
Absorption et imbibition. 103
Absorption dans les plantes. . . 103
Absorption dans les animaux. . 103
Dialyse 104

LIVRE IV

DES GAZ

Propriétés des gaz. 106
Caractères physiques des gaz. . . 106
Théorie dynamique des gaz. . . . 107
Force expansive. 107
Poids des gaz. 107
Densité de l'air par rapport à l'eau. 108
Pressions exercées par les gaz. . . 108
Principe de Pascal et principe d'Archimède applicables aux gaz. . 109
Transvasement des gaz. 109
Atmosphère, sa composition. . . . 110
Pression et hauteur de l'atmosph. 110
Crève-vessie, hémisphères de Magdebourg. 111

Baromètres 112
Expérience de Torricelli 112
Expériences de Pascal. 113
Valeur de la pression atmosphériq. 114
Baromètre à cuvette. 115
Baromètre de Fortin. 116
Baromètre fixe de Regnault. . . . 118
Baromètre de Gay-Lussac. 119
Conditions auxquelles doit satisfaire un baromètre. 121
Correction relative à la capillarité. 122
Correction relative à la température. 123
Variations de la hauteur baromét. 124
Leurs causes 125
Relations entre les variations barométriques et l'état du ciel. . 126
Baromètre à cadran 127
Mesure des hauteurs par le baromèt. 128

Mesure de la force élastique des gaz. 129
Loi de Mariotte. 129
Expérience de Dulong et Arago. . 131
Conséquences de la loi de Mariotte. 134

Problèmes sur la loi de Mariotte. 134
Manomètres. 135
Manomètre à air libre. 135
Manomètre à air comprimé. . . . 136
Manomètre baromét. de Regnault. 138
Manomètre de Bourdon 139

Diffusion, osmose et absorption des gaz 140
Diffusion ou mélange des gaz. . . 140
* Effusion, transpiration et osmose. 141
* Absorption des gaz par les solides. 143
* Perméabilité et pouvoir absorbant des métaux à une haute température 143
* Occlusion. 143
Absorption des gaz par les liquides. 144
Coefficient d'absorption. 145
Problème sur les mélanges des gaz et des liquides. 145
Équilibre des fluides. 145

Corps plongés dans l'air. 146
Principe d'Archimède appliqué aux gaz 146
Baroscope. 146
Correction des pesées dans l'air. . 147
Aérostats 148
Construction des aérostats. 149
Parachute. 152
Poids que peut enlever un ballon. 153

Appareils fondés sur les propriétés de l'air. 154
Machine pneumatique. 154
Éprouvette de la machine pneumat. 159
Robinet à double épuisement. . . 159
Machine pneumatique de Ducrétet 161
Usages de la machine pneumatique. 162
Problèmes sur la machine pneumat. 163
* Machine pneumat. à double effet. 165
* Machine pneumat. à mercure. . 166
Machine de compression. 167
Pompe de compression. 169
* Fontaine de Héron. 170
* Fontaine intermittente. 171
* Siphon. 172
* Siphon à écoulement constant. . 174
* Siphon intermittent. 174

Pompes 175
Pompe aspirante 175
Pompe foulante. 177
Pompe aspirante et foulante. . . . 178
Pompe à incendie. 178
Charge que porte le piston. 179
* Flacon de Mariotte. 179

LIVRE V

ACOUSTIQUE

Objet de l'acoustique. 181
Son et bruit. 181
Cause du son. 181
Sonnerie dans le vide. 182
Mode de propagation du son. . . . 183
Causes qui font varier l'intensité. 185
Influence des tuyaux sur l'intensité. 186
Vitesse du son dans les gaz. . . . 186
Formule de Newton. 188
* Expériences de M. Regnault sur la propagation des ondes. . . . 189
Vitesse du son dans les liquides et dans les solides 189
Réflexion du son. 190
Échos et résonnances. 191
Réfraction du son. 192
Porte-voix, cornet acoustique . . 193
Stéthoscope. 194

Mesure du nombre de vibrations. 194
Sirène. 194
Soufflerie. 196
Roue de Savart. 197
Limite des sons perceptibles. . . . 198
Méthode graphique. 199
* Phonautographe de Scott 200
* Méthode optique de Lissajous. . 201
* Composition de deux mouvements vibratoires parallèles 201
* Id. de deux mouvements rectangu. 202
* Flammes manométriq. de Kœnig. 204

Théorie physique de la musique. . 206
Qualités du son musical. 206
Hauteur, intensité, timbre. . . . 206
Unisson. 207
Battements 207
Accords, intervalles. 207
Harmoniques 208
Échelle musicale, gamme. 208
Intervalles de la gamme. 209
Accords parfaits 210
Diapason 210
Notation des gammes, nombre absolu de vibrations. 211
Longueur des ondes 211

Vibrations transversales des cordes. 212
Sonomètre. 212
Lois des vibrations des cordes. . . 213
Vérification expérimentale. 214
Nœuds et lignes nodales. 215
Problèmes sur les vibrations des cordes. 216
Vibrations longitudin. des cordes. 217

Vibrations de l'air dans les tuyaux. 217
Tuyaux à bouche. 218
Tuyaux à anche. 219
Sons harmoniq. d'un même tuyau. 221
Nœuds et ventres de vibration. . 222
Leur disposition 224
Origine des nœuds et des ventres. 225
Formules des tuyaux sonores. . . 226
Loi des longueurs 227
Lois de Bernoulli 227
Elles ne sont qu'approchées. . . . 228
Problèmes sur les tuyaux sonores. 228

* *Vibrations des verges.* 230
Vibrations des plaques. 230
Vibrations des membranes. 231

* *Analyse et synthèse des sons.* . . 232
Sons simples et sons composés. . . 232
Analyse des sons par les résonnateurs 232
Appareil pour l'analyse des sons. . 233
Synthèse des sons. 234
Cause du timbre 236
Perception des sons. 237

LIVRE VI

CHALEUR

Hypothèses sur la nature de la chaleur, théorie dynamique. . . 238
Travail interne et travail externe de la chaleur 239
Historique de la théorie dynamiq. 240
Effets de la chaleur, dilatation. . . 240
Expériences qui montrent la dilatation. 241
Mesure des températures. 242
Thermomètres. 242
Calibrage du tube 243
Remplissage du thermomètre. . . 244
Graduation 245
Détermination du zéro. 245
Détermination du point 100. . . . 246
Construction de l'échelle. 248
Différentes échelles thermométriq. 249
Déplacement du zéro. 250
Limites du thermomètre à mercure. 250
Conditions de sensibilité. 251
Thermomètre à alcool. 251
Thermomètre différentiel de Leslie. 253
Thermoscope de Rumford. 254
Thermomètre de Bréguet 255
Thermomèt. à maxima et à minima. 255
* Thermo. à maxima de Negretti. 256
* Thermomètre de Walferdin. . . 257
Pyromètres 258
Thermomètre électrique. 259

Notions sur les aimants et sur les piles thermo-électriques. 259
Aimant et aiguille aimantée . . . 259
Piles et courants thermo-électriq. 260
Action des courants sur les aimants. 262
Notions sur le galvanomètre. . . . 262
Thermo-multiplicateur de Melloni. 263

Dilatation des solides 265
Dilatation linéaire et dilatation cubique, coefficients de dilatation. 265
Mesure des coefficients de dilatat. 265
Méthode de Lavoisier et Laplace. 265
Méthode de Roy et Ramsden. . . . 267
Table des coefficients de dilatation. 268
Les coefficients de dilatation augmentent avec la température. . 269
Formules sur les dilatations . . . 269
Problèmes sur les dilatations . . . 270
Applications des dilatations. . . . 271
Pendule compensateur. 271
Lames compensatrices 272

Dilatation des liquides. 273
Dilatat. apparente et dilat. absolue. 273
Dilatation absolue du mercure. . 274
Dilatation apparente du même. . 275
Thermomètre à poids. 276
Coefficient de dilatation du verre. 276
Coefficients de dilatat. des liquides. 276
Table des coefficients des liquides. 277
Application du thermom. à poids. 277
Correction de la hauteur baromét. 277
Maximum de densité de l'eau. . . 278
Table de Despretz 279
Correction des poids spécifiques des solides et des liquides. . . . 280

Dilatation et densité des gaz . . . 281
Méthode de Gay-Lussac. 281
Formules et problèmes. 283

Méthode de M. Regnault. 285
Deuxième méthode du même. . . . 288
Troisième méthode du même . . . 290
* Thermomètre à air. 291
* Pyromètre à air. 292
* Zéro absolu. 292
Densités des gaz par rapport à l'air. 292
Méthode de M. Regnault. 293
Gaz qui attaquent le cuivre. . . . 296
Densités des gaz par rapp. à l'eau. 297

Changements d'état. 297
Fusion, ses lois. 297
Températures de fusion 298
Chaleur latente. 299
Dissolution 299
Solidification, ses lois 300
Cristallisation. 300
Formation de la glace. 300
Regélation de la glace. 301
Causes qui retardent la congélation, surfusion. 302
Mélanges réfrigérants. 303

Vapeurs. 304
Vaporisation 304
Force élastique des vapeurs. . . . 304
Formation des vapeurs dans le vide. 305
Espace saturé, maxim. de tension. 306
Vapeurs non saturées. 307
Tension au-dessous de zéro. . . . 308
Tension de zéro à 100 degrés . . . 309
Tension au-dessus de 100 degrés. . 311
Méthode de M. Regnault. 312
Table des forces élastiques. 314
Tension des vapeurs de divers liquides. 315
Tension des dissolutions salines . . 315
Tension dans deux vases inégalement chauds. 316
Évaporation. 317
Causes qui l'accélèrent. 318
Ébullition, ses lois. 318
Températures d'ébullition 319
Influence des substances en dissolution sur la temp. d'ébullition. 319
Influence de la nature des vases. . 320
Influence de l'air en dissolution. . 320
Influence de la pression. 321
Bouillant de Franklin 322
Mesure de la hauteur des montagnes par la température d'ébullit. 323
Production de la vapeur en vase clos 323
Marmite de Papin 324
Chaleur latente des vapeurs. . . . 325
Froid produit par l'évaporation. . 326
Congélation du mercure. 326
Cryophore. 326

Liquéfaction des vapeurs et des gaz. 327
Distillation, alambics 328
Alambic de Salleron. 329
Absorption, tubes de sûreté. . . . 330
Liquéfaction des gaz. 332
Liquéfaction et solidification de l'acide carbonique. 332
Liquéfaction du protoxyde d'azote. 335

Mélanges des gaz et des vapeurs. . 337
Lois de Dalton 337
Problèmes sur les mélanges des gaz et des vapeurs 339
* *État sphéroïdal*. 340
* *Densités des vapeurs*. 341
Méthode de Gay-Lussac 341
Méthode de Dumas. 342
Table des densités des vapeurs . . 342
Procédé de Sainte-Claire Deville. . 343
Rapport entre un volume de liquide et celui de sa vapeur. . . 343

Hygrométrie. 344
État hygrométrique 344
Hygromètre chimique 345
Hygromètre à cheveu. 346
Table de Gay-Lussac. 348
* Hygromètre de Daniell. 350
* Hygromètre de Regnault. 352
Hygroscopes. 353
* Psychromètre. 353
Problèmes sur l'hygrométrie. . . . 354

Calorimétrie. 356
Objet de la calorimétrie, calorie. . 356
Chaleurs spécifiques. 356
Expérience de Tyndall. 357
Mesure de la chaleur absorbée par un corps qui s'échauffe. 357
Méthode des mélanges. 357
Appareil de M. Regnault. 359
Méthode du calorimètre de glace. 360
Puits de glace. 361
Chaleurs spécifiques des liquides. . 361
Table des chaleurs spécifiques. . . 362
* Loi de Dulong et Petit. 362
* Chaleurs spécifiques des gaz. . . 363
Chaleur latente de fusion 364
Chaleur de fusion de la glace . . . 364
Chaleur latente des vapeurs. . . . 364
Calorimètre à mercure de Fabre et Silbermann. 366
Problèmes sur les chaleurs spécifiques et sur les chaleurs latentes. 368

* *Équivalent mécan. de la chaleur.* 369
Expériences de Joule. 369
Applications de la thermodynam. 371
* *Décomposition par la chaleur.* . 372
Dissociation 372
Conductibilité. 372
Conductibilité des solides 372
Conductibilité des liquides. 375
Mode d'échauffement des liquides. 376
Conductibilité des gaz. 376
Conductibilité de l'hydrogène. . . 376
Convection 377
Applications de la conductibilité . 377
Rayonnement de la chaleur. 378
Lois du rayonnement. 379
Intensité de la chaleur rayonnante, ses lois 380
Équilibre mobile de température. 383
Loi de Newton sur le refroidiss. . 383
Conséquences de la loi de Newton. 384
Réflexion de la chaleur. 384
Lois de la réflexion. 384
Leur démonstration par l'appareil de Melloni 384
Réflexion irrégulière, diffusion. . 386
Réflexion par les miroirs. 386
Expérience des miroirs conjugués. 388
Miroirs ardents. 389
Réflexion dans le vide. 389
Réflexion apparente du froid . . . 390
Pouvoir réflecteur. 390
Pouvoir absorbant 392
Pouvoir émissif. 393
Égalité des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs 394
Expérience de Ritchie 394
Causes qui modifient les trois pouvoirs 396
Applications 398
Pouvoir diathermane 400
Expériences de Melloni 400
Causes qui modifient le pouv. diat. 401
Diathermanéité des gaz 402
Applications 403
Différentes espèces de rayons calorifiques. 403
Sources de chaleur 404
Différentes sources de chaleur. . . 404
Sources mécaniques. 404
Chaleur due au frottement. 404
Expérience de Tyndall. 405
Chaleur due à la pression et à la percussion 405
Expérience de Tyndall sur la compression des gaz 406
Chaleur engendrée par le choc. . . 406
Sources physiques. 406
Radiation solaire. 406
Chaleur terrestre. 409
Chaleur dégagée par l'imbibition. 410
Sources chimiques. 411
Combinaisons, combustion. 411
Chaleur dégagée par la combustion. 412
Lois de la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques. 413
Appareils pour obtenir de très-hautes températures. 413
Chauffage. 414
Cheminées. 414
Tirage des cheminées. 415
Poêles. 416
Chauffage par la vapeur 417
Chauffage par l'air chaud. 417
Chauff. par circulat. d'eau chaude. 418
Sources de froid. 419
Froid par la dilatation des gaz. . 420
Rayonnement nocturne. 420
Machines à vapeur. 420
Générateur de vapeur. 421
Machines à double effet. 423
Régulateur à force centrifuge . . 423
Pompe alimentaire. 425
Distribution de vapeur 425
Locomotive. 426
Machines à réaction, éolipyle. . . 429
Machines à basse, à haute et à moyenne pression. . . 429
Id. à détente et sans détente. 430
Cheval-vapeur 430

LIVRE VII

LUMIÈRE

Hypothèses sur la lumière. 431
Corps lumineux, diaphanes, opaq. 432
Rayons et faisceaux lumineux. . . 432
Propagation de la lumière. 433
Ombre, pénombre, reflet. 433
Images par de petites ouvertures. 435
Vitesse de la lumière. 436
Expérience de Foucault 438

périence de Fizeau. 440
ds de l'intensité de la lumière. 440
otomètres. 441
rificat. de la 1re loi de l'intensité. 442

flexion de la lumière. 442
ds de la réflexion. 442
flexion irrégul., lumière diffuse. 444
tensité de la lumière réfléchie. . 445

iroirs plans. 445
rmation des images 445
ages virtuelles et images réelles. 447
ages multiples dans un miroir. . 447
Id. dans deux miroirs. 448

iroirs sphériques. 449
yers des miroirs concaves. . . . 450
ur détermination expérimentale. 454
Id. graphique . . . 454
nstruction des images réelles. . 455
nstruction des images virtuelles. 457
roirs convexes, foyers. 457
termination des foyers 458
nstruction des images. 459
rmules des miroirs sphériques. . 459
scussion. 460
lcul de la grandeur des images. 461
erration de sphéricité caustiq. 461
plications des miroirs. 462
roirs paraboliques. 462

fraction simple. 463
is de la réfraction. 464
lice de réfraction. 466
lets produits par la réfraction. . 466
gle limite, réflexion intérieure. 467
rage. 468

ansmission de la lumière à travers les milieux diaphanes. . . 469
lieux à faces parallèles. 469
ismes 470
rche des rayons dans les prismes. 470
lyprisme prisme à angle variab. 471
plication du prisme rectangle. . 472
ondition d'émergence. . 472
Déviation minimum. 473
Mesure des indices de réfraction
des solides 474
Id. des liquides 474
Id. des gaz. 475
Table des indices de réfraction. 476

ntilles, leurs effets. 476
fférentes espèces de lentilles. . . 476
yers dans les lentilles biconv. 477
ntre optique, axes secondaires. 480
Détermination expér. des foyers . 481
Détermination graphique 481
Construction des images réelles. . 483
Relation entre la grandeur de l'image et celle de l'objet. . 484
Construction des images virtuelles. 485
Foyers des lentilles biconcaves . . 485
Construction des images dans id. . 486
* Formule des lentilles. . 487
* Aberration de sphéricité, caustiq. 488
* Laryngoscope. 489

Dispersion. 489
Spectre solaire 489
Couleurs simples 491
Recomposition de la lumière. . . . 493
Théorie de Newton sur les couleurs. 495
Couleurs complémentaires . . . 495
Composition du spectre. . . . 495
Pouvoir lumineux des divers faisceaux expérience de Draper . . 496
Pouvoir calorifique, expérience de Müller. 496
Pouvoir chimique, expérience de Stokes 498
* Analogie entre la chaleur et la lumière. 499
* Raies du spectre 499
* Applications des raies du spectre. 500
* Spectroscope analyse spectrale. 500
* Expériences avec le spectroscope. 502
* Coloration des objets vus au travers d'un prisme. 503
* Aberration de réfrangibilité. . . 504
* Achromatisme 504
* Absorption par les milieux transparents. 505

Instruments d'optique 506
Divers instruments d'optique . . . 506

Instruments qui grossissent 506
Microscope simple 506
Conditions de netteté des images. 508
Diamètre apparent. 509
Mesure du grossissement. 510
Microscope composé 511
Microscope de Nachet 512
Micromètre chambre claire, mesure du grossissement 515
* Microscope binoculaire de Nachet 517
Achromatisme du microscope, oculaire de Campani 518
Champ dans les instruments d'opt. 519
Applications du microscope . . . 520

Instruments qui rapprochent . . . 520

Lunette astronomique. 520
Réticule, axe optique, grossissement 522
Lunette terrestre. 523
Lunette de Galilée. 524
Télescopes. 525
Télesc. de Newton et de Foucault. 527

Instruments de projection 530
Chambre obscure. 530
Chambre claire. 532
Lanterne magique 533
Microscope solaire 534
* Microscope photo-électrique. . . 536
Lentilles à échelons, phares. . . . 537

Photographie 539
Daguerréotype 539
Photogr. sur verre collodionné . . 543
Épreuves positives sur verre. . . . 544
Photographie sur verre albuminé. 544

Vision. 546
Structure de l'œil humain. 546
Marche des rayons dans l'œil. . . 548
Renversement des images 548
Angle optique, angle visuel. . . . 548
Appréciation des distances 549
Distance de la vue distincte. . . . 550
Vue simple avec les deux yeux . . 551
Cause du relief apparent des corps. 551
Stéréoscope. 552
Partie insensible de la rétine. . . 553
Persistance de l'impression sur la rétine. 553
Images accidentelles. 553
Irradiation 554
Auréoles accidentelles, contraste. 554
Non-achromatisme de l'œil. 554
Myopie, presbytisme 555
Besicles 555
Diplopie. 556
Achromatopsie 556
Ophthalmoscope. 556

* *Sources de lumière*. 558
Phosphorescence 558
Phosphoroscope. 559
Fluorescence 561

* *Double réfraction*. 561
Cristaux à un axe 562
Rayon ordinaire et rayon extraor. 562
Lois de la double réfraction dans les cristaux à un axe. 562
Lois dans les cristaux à deux axes. 563

* *Diffraction et franges* 563
Interférences. 564
Longueur des ondulations, causes des couleurs 566
Couleurs des lames minces, anneaux de Newton 566
Réseaux. 567

* *Polarisation* 567
Polarisation par réflexion 567
Angle et plan de polarisation . . . 568
Polarisation par simple réfraction. 568
Polarisation par double réfraction. 569
Polariscopes ou analyseurs. 569
Appareil de Noremberg 570

* *Polarisation rotatoire* 572
Coloration par la polarisation rotatoire 572
Pouvoir rotatoire des liquides. . . 573
Saccharimètre. 574
Application du saccharimètre. . . 575

* *Coloration par l'interférence des rayons polarisés*. 575
Lois de l'interférence des rayons polarisés 575
Teintes par les lames minces. . . . 576
Influence de l'épaisseur des lames. 579
Théorie de la coloration de la lumière polarisée. 579
Anneaux par la lumière polarisée à travers les lames biréfring. . 580
Anneaux dans les cristaux à 2 axes. 581
Coloration par le verre trempé. . . 582
Polarisation de la chaleur. 582

LIVRE VIII

MAGNÉTISME

Aimants naturels et artificiels. . . 584
Pôles et ligne neutre. 585
Actions mutuelles des pôles 586
Fluides magnétiques 587
Théorie d'Ampère sur le magnétis. 587
Substances magnétiques. 587
Aimantation par influence. 588
Force coercitive 588
Expérience des aimants brisés. . . 589
Action des aimants sur tous les corps; corps diamagnétiques . . 589
Magnétisme terrestre 590
Action directrice de la terre. . . . 590
Couple magnétique terrestre. . . . 591

Méridien magnétique, déclinaison. 591
Variations de la déclinaison 592
Boussole de déclinaison 593
Méthode du retournement 594
Boussole marine 595
Inclinaison, équateur magnétique. 597
Boussole d'inclinaison 598
Aiguille astatique 599
Aimantation 599
Sources d'aimantation 599
Méthode de la simple touche. . . . 600
Méthode de la touche séparée . . . 600
Méthode de la double touche . . . 600
Aimantat. par l'action de la terre. 601
Faisceaux magnétiques. 602
* *Loi des actions magnétiques*. . . 603
Intensité et distribution du magnétisme terrestre. 605

LIVRE IX

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Hypothèses sur la nature de l'électricité 606
Électricité statique et dynamique. 607
Électrisation par le frottement. . 607
Pendule électrique. 608
Corps conducteurs 608
Corps isolants, réservoir commun. 609
Deux espèces d'électricité 610
Théories de Symmer et de Franklin. 610
Théorie moderne de l'électricité. . 611
Application à cette théorie du langage ancien 612
Actions mutuelles des deux électricités. 613
Loi de l'électrisation par frottem. 613
Diverses sources d'électricité. . . . 614
Mesure des forces électriques. . . 615
Lois des attractions et des répulsions 615
* Expériences de Harris 618
L'électricité se porte à la surface des corps tension. 619
Influence de la forme des corps . . 622
Pouvoir des pointes. 623
Électrisation des corps en contact. 623
Déperdition de l'électric. dans l'air. 624
Déperdition dans le vide. 625
Électrisation par influence. 625
Appareil de Riess. 627
Limite à l'électrisat. par influence. 628
* Théorie de Faraday 629
Communication de l'électricité à distance, décharge disruptive . 631
Mouvements des corps électrisés. . 632
Électroscope à feuilles d'or 632
Machines électriques 634
Électrophore 634
Machine électrique de Ramsden. . 635
Soins à donner aux mach. élect. . 637
Tension maxima. 638
Électromètre de Henley 639
Conducteurs secondaires. 639
Machine de Nairne. 639
Machine de Van Marum 640
Machine d'Armstrong. 641
* *Nouvelles machines électriques*. . 643
Machine de Holtz. 643
Machine diélectrique de Carré. . . 646
Expériences diverses 648
Étincelle électrique. 648
Durée de l'étincelle 648
Tabouret électrique. 652
Carillon électrique. 652
Tourniquet électrique, insufflation. 654
Poisson volant de Franklin. 655
Condensation de l'électricité 656
Condensateurs, leur théorie. . . . 656
Décharge lente du condensateur. . 659
Décharge instantanée et décharge secondaire 659
Limite de charge. 660
Calcul de la force condensante. . . 660
Carreau fulminant. 661
Bouteille de Leyde. 662
Bouteille à armatures mobiles. . . 664
Jarres et batteries. 665
Électromètre condensateur. 667
Effets de l'électricité. 668
Effets physiologiques. 668
Effets lumineux œuf électrique. . 669
Bouteille tube et carreau étincelants 671
Effets calorifiques. 672
Effets mécaniques. 673
Effets chimiques 675
Pistolet de Volta 675
Eudiomètre 676

LIVRE X

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

Expérience et théorie de Galvani. . 678
Expérience de Volta. 679
Théorie du contact, de Volta . . . 681
Pile de Volta. 682
Distribution de l'électricité dans la pile. 683
Tension de la pile. 684
Pôles, électrodes, courant. 685

Diverses modifications de la pile. . 685
Pile à auges. 685
Pile de Wollaston. 686
Pile sèche de Zamboni. 688
* Électromètre de Bohnenberger. . 688
* Appareil à rotation. 689

Théorie chimique de la pile. 690
Électricité due aux actions chimiq. 690
Lois du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques . . . 690
Théorie électro-chimiq. d'Ampère. 691
Théorie chimique de la pile. . . . 692
La force électromotrice varie avec les métaux et les acides. 693
Courants secondaires. 694
Polarité. 694

Piles cloisonnées à deux liquides. 695
Objet des piles à deux liquides. . . 695
Pile de Daniell 695
Pile à ballon 697
Pile de Grove. 698
Pile de Bunsen. 699
Manipulation de la pile de Bunsen. 701
Propriété du zinc amalgamé. . . . 702

* *Nouvelles piles* 702
Pile au bichromate de potasse. . . 702
Pile au sulfate de mercure. 702
Pile de Callaud. 703
Pile de Minotto 704

Effets divers des courants 704
Effets physiologiques. 705

Effets calorifiques. 706
Lois de la chaleur due au passage des courants. 707
Cause de la chaleur dégagée dans la pile, travail correspondant. . 707

Effets lumineux. 708
Arc voltaïque. 708
Transport par l'arc voltaïque. . . 710
Projection des deux charbons. . . 711
* Régulateur de la lumière électrique de Foucault. 711
Propriétés et intensité de la lumière électrique 714

Effets mécaniques. 716
Transports mécan. par les courants. 716
Expériences de L. Daniel sur l'action mécanique des courants. . 716

Effets chimiques 717
Décomp. de l'eau, électrolysation. 717
Voltamètre, unité d'intensité, équivalent électrique 718
Lois de l'action électrolysante. . . 719
Loi de Faraday sur les décompositions électro-chimiques 720
Décomposition des oxydes, des acides et des composés binaires . . 720
Décomposition des sels ternaires. . 722
Effets secondaires de l'électrolyse. 723
Théorie de Grotthus. 723
Transports électro-chimiques. . . 724

Galvanoplastie 725
Dorure galvanique. 726
Argenture 727

Effets magnétiques des courants. . 728
Expérience d'Œrsted, loi d'Ampère. 728
Galvanomètre, sa théorie. 728
Sa construction. 730
Sa graduation 732
Ses usages 733
Conditions de sa construction. . . 733
Boussole galvanométrique. 734

Courants thermo-électriques. . . . 734
Expérience de Seebeck. 734
Causes des courants thermo-électr. 735
Pouvoir thermo-électr. des métaux. 736
Propriétés des courants thermo-électriques 736
Couple et pile thermo-électriques de Pouillet. 737
Lois des courants thermo-électr. . 738
* Pile au sulfure de cuivre de Ed. Becquerel. 738
Applications des courants thermo-électriques. 740
* Thermomèt. électr. de Becquerel. 740
* Pyromètre élect. d'Ed. Becquerel. 741

* *Mesure et lois de l'intensité des courants*. 743
Intensité des courants 743
Boussole des sinus 743
Rhéostat de Wheatstone 745
Unité et lois des résistances 746
Conductibilité pour les courants. . 746
Lois de Ohm sur les courants thermo-électriques 747
Leur vérification expérimentale. . 747
Formules sur les lois de Ohm, longueur réduite. 747
Mesure de la force électromotrice. 748
Application des lois de Ohm aux courants hydro-électriques. . . 748
Formules générales sur les piles. . 749
Combinaisons diverses des couples d'une pile 749
Condition pour l'effet maximum. . 751
Vitesse de l'électricité 751
État permanent et état variable. . 752
Courants dérivés, lois de la dérivation 752

Électro-dynamique. 753
Actions mutuelles des courants . . 753
Lois des courants parallèles. . . . 753
Lois des courants angulaires . . . 756
Lois des courants sinueux. 758

Direction des courants par les cour. 758
Action d'un courant indéfini sur un courant perpendic. à sa direct. . 758
Action d'un courant indéfini sur un courant rectangulaire ou circul. 760

Rotation des courants par les courants. 760
Rotation d'un courant horizontal par un courant horizontal. . . . 760
Rotation d'un courant vertical par un courant circulaire horizontal. 761

Électro-magnétisme. 762
Actions des courants sur les aimants. 762
Action directrice des aimants sur les courants. 763
Rotation des aimants par les cour. 764
Rotation des courants par les aimants. 765
Rotation électro-dynamique des liquides. 766
Commutateur de Bertin. 769

Solénoïdes. 770
Action des courants sur les solén. 770
Action de la terre sur les solénoïdes. 771
Actions mutuelles des aimants et des solénoïdes 771
Actions mutuelles des solénoïdes. 771
Théorie d'Ampère sur le magnétis. 772
Direction des courants d'Ampère. 773
Courant terrestre. 774

Action de la terre sur les courants. 774
Action sur les courants verticaux. 774
Action sur les courants horizont. 775
Action sur les courants fermés. . . 776
Courants astatiques 777

Aimantation par les courants. . . 777
Électro-aimants. 778
Magnétisme rémanent. 780
* Mouvement vibratoire et sons produits par les courants. 780

Télégraphes électriques. 781
Principe général de ces télégraph. 781
Leurs parties constituantes 782
Fil de ligne. 782
Télégraphe à cadran. 783
Télégraphe écrivant de Morse. . . 786
Récepteur de Morse 786
Manipulateur id. 789
Parafoudre 789
Relais. 791
Sonnerie électrique. 792
* Télégraph. imprimant de Hughes. 862
* Récepteur id. 797
* Régulateur id. 800
* Télégraph. électro-chimique. . . 801
* Télégraphe transatlantique . . . 801
* Galvanomètre récept. de Thomson 803
* Moteur électro-magnétique . . . 805

Induction. 805
Induction par les cour. discontinus 805
Induction par les courants continus. 807
Conditions pour qu'il y ait induction, loi de Lenz 808
Induction par l'électricité statique 808
Induction par les aimants. 810
Induction par les aimants sur les corps en mouvement. 811
Induction par l'action de la terre. 812
Induction d'un courant sur lui-même, extra-courant d'ouverture 814
Extra-courant de fermeture 815
Induction dans les circuits non fermés 816
Courants induits de différ. ordres. 816

Machines d'induction. 817
Origine des machines d'induction. 817

Appareil de Pixii. 817
Appareil de Clarke. 818
* Machine de Nollet. 824
* Bobine de Siemens. 828
* Machine de Wilde. 829
* Machine de Ladd. 831
* Machine de Gramme. 833
Bobine de Ruhmkorff 835
Ses effets. 839
Effluve électrique. 839
* Expérience de Hittorf. 843
* Stratification de la lumière électrique. 844
* Tubes de Geissler. 845
* Application. 847
* Fusée de Stateham. 847
* *Propriétés, intensité et direction des courants induits*. 848
* Comparaison des courants induits inverse et direct. 848
* Lois de l'intensité des courants induits. 848
* Propriétés des courants induits. 849
* Leur direction sur les disques tournants. 849
* *Effets des aimants puissants, diamagnétisme*. 851
* Effets optiques. 851
* Chaleur développée par l'induction, expérience de Foucault. 852
* Machine à induction péripolaire de Le Roux. 853
* Expérience de de la Rive sur la rotation des jets électriques. . 855
* *Diamagnétisme*. 856
* Substances diamagnétiques et substances paramagnétiques. . 856
* Effets diamagnétiques. 857
* Théorie du diamagnétisme . . . 858

MÉTÉOROLOGIE ET CLIMATOLOGIE

Objet de la météorologie. 859
Météores aériens 859
Direction et vitesse des vents. . . 859
Leur cause. 859
Vents réguliers, périodiques, varia. 860
Loi de la rotation des vents. 861
Météores aqueux 862
Nuages 864
Pluie, pluviomètre. 864
Brouillards 865
Rosée, serein, gelée blanche. . . . 866
Neige, grésil, verglas. 867
Grêle. 867
Trombes. 868
* *Appareils enregistreurs*. 869
Météorographe du P. Secchi. . . . 869
Météores lumineux. 877
Électricité atmosphérique 877
Appareils pour l'apprécier. 877
Électromètre à conducteur mobile de Palmieri 879
Électricité habituelle de l'atmosphère et des nuages, sa cause. 882
Éclairs 883
Bruit du tonnerre. 884
Effets de la foudre. 884
Choc en retour. 885
Paratonnerre. 886
Aurore boréale 887
* Arc-en-ciel 889
Climatologie 891
Températures moyennes. 891
Causes qui modifient la température de l'air. 891
Lignes isothermes. 893
Climats 895
Distribution de la température à la surface du globe. 895
Température des mers, courants marins 896
Températ. des lacs et des sources. 897
Distribution des eaux sur le globe. 897

RECUEIL DE PROBLÈMES. 899

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

2970. — Tours, impr. Mame.

COURS DE PHYSIQUE

PUREMENT EXPÉRIMENTALE ET SANS MATHÉMATIQUES

A l'usage des gens du monde, des candidats au baccalauréat ès lettres, des écoles normales primaires, des institutrices, des pensions de demoiselles, etc.

OUVRAGE DE LUXE

illustré de 385 magnifiques gravures intercalées dans le texte et d'une planche coloriée

PAR A. GANOT

CINQUIÈME ÉDITION

Augmentée de plusieurs vignettes

Un volume in-12 de 522 pages. — Prix, broché : 5 fr. 50 c.

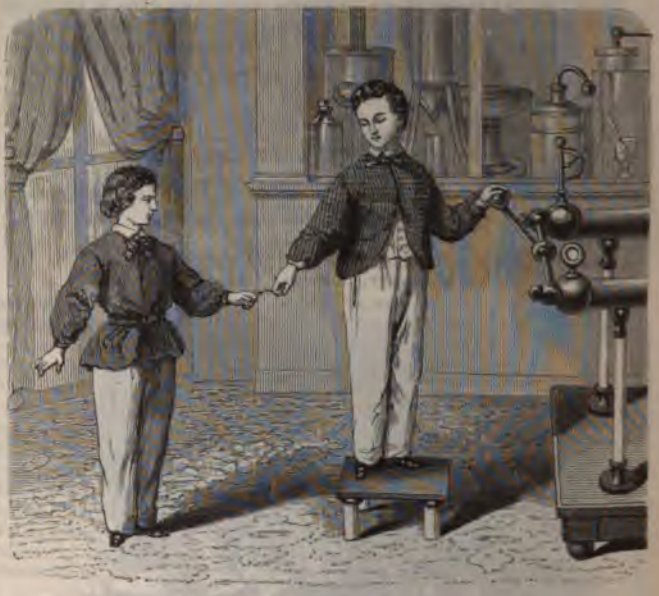
Même prix par la poste, en adressant *franco* un mandat sur la poste, à M. Ganot, 8, rue du Jardinet.

Cornet acoustique.

Ce livre n'est point un abrégé du Traité de physique expérimentale et appliquée, et de météorologie, du même auteur. Le

texte en diffère entièrement ; sauf un très-petit nombre, il en est de même des vignettes, ainsi que le montrent les spécimens ci-joints.

Comme son titre l'indique, le COURS DE PHYSIQUE PUREMENT EXPÉRIMENTALE est destiné aux lecteurs étrangers aux études mathématiques. Il ne faudrait pas en conclure que les matières qu'il renferme ne soient traitées que sous une forme superficielle et



Tabouret électrique.

incomplète. En effet, un très-grand nombre de phénomènes physiques, comme les propriétés des gaz et des liquides, la plus grande partie de l'acoustique, de la chaleur et de la lumière, la photographie, toute l'électricité, l'argenture et la dorure par la pile, la galvanoplastie, la télégraphie électrique, peuvent être démontrés par l'expérience et parfaitement compris sans le secours des mathématiques. C'est pourquoi, tout en s'abstenant de formules et de théories abstraites, l'auteur a pu décrire avec des développements suffisants les progrès des sciences physiques depuis un siècle, et leurs nombreuses applications.

Le Cours de physique purement expérimentale s'adresse donc non-seulement aux personnes qui désirent acquérir des connaissances élémentaires exactes sur la physique et sur ses belles applications, mais aux instituteurs, aux institutrices, aux pensions de demoiselles, aux écoles normales primaires, etc.

Enfin les candidats au baccalauréat ès lettres y trouveront toutes les matières exigées pour la physique dans leur examen.

En adressant franco un bon de poste de 5 fr. 50 à M. Ganot, 8, rue du Jardinet on recevra sans retard, par la poste et franc de port, un exemplaire broché.

Prix du Traité de physique et de météorologie, 16e édit., par la poste, 7 fr.

Toute lettre non affranchie est refusée.

A PARIS

CHEZ L'AUTEUR, 8, RUE DU JARDINET,

ET CHEZ TOUS LES LIBRAIRES

2970. — Tours, impr. Mame.

Bulletin mensuel. — N° 72

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

Rue Hautefeuille, 19, près du boulevard Saint-Germain, à Paris

NOVEMBRE 1875

DERNIÈRES NOUVEAUTÉS

NOUVEAUX ÉLÉMENTS DE PHYSIOLOGIE HUMAINE comprenant les principes de la physiologie comparée et de la physiologie générale, par H. Beaunis, professeur de physiologie à la Faculté de médecine de Nancy, 1 vol. in-8 de 1100 p. avec 550 fig. cart . . . . . 14 fr.

GÉOLOGIE DES ENVIRONS DE PARIS, ou description des terrains et énumération des fossiles qui s'y rencontrent, suivie d'un index géographique des localités fossilifères, cours professé au Muséum d'histoire naturelle par Stanislas Meunier, aide-naturaliste au Muséum d'histoire naturelle, etc. 1875, 1 vol. in-8 de 520 pages avec 112 fig. . . . . 10 fr.

HISTOIRE DE LA GÉNÉRATION CHEZ L'HOMME ET CHEZ LA FEMME, par le docteur David Richard. 1 vol. in-8 de 350 pages avec 8 pl. gravées en taille-douce et tirées en couleur. Cart. . . . . 12 fr.

LEÇONS SUR LA CHALEUR ANIMALE, sur les effets de la chaleur et sur la fièvre, par M. Claude Bernard, membre de l'Institut de France et de l'Académie de médecine. 1 vol. in-8 de 469 p., avec fig. 7 fr.

NOUVEAU DICTIONNAIRE DES PLANTES MÉDICINALES, description, habitat et culture, récolte, conservation, partie usitée, composition chimique, formes pharmaceutiques et doses, action physiologique, usages dans le traitement des malades, suivi d'une étude générale sur les plantes médicinales au point de vue botanique, pharmaceutique et médical, avec clef dichotomique, tableaux des propriétés médicales et mémorial thérapeutique, par le docteur A. Hérand, professeur à l'Ecole de médecine navale de Toulon. 1 vol. in-18 jésus de 600 pages, avec 261 fig. Cart. . . . . 6 fr.

LE TABAC ET L'ABSINTHE, leur influence sur la santé publique, sur l'ordre moral et social, par le docteur Paul Jolly, membre de l'Académie de médecine. 1 vol. in-18 jésus de 216 pages. . . . . 2 fr.

ÉLÉMENTS DE BOTANIQUE MÉDICALE, par A. Moquin-Tandon, membre de l'Institut. Troisième édition. 1 vol. in-18 de 543 pages avec 133 figures. . . . . 6 fr.

MÉMOIRES D'UN ESTOMAC ÉCRITS PAR LUI-MÊME pour le bénéfice de tous ceux qui mangent et qui lisent, traduit de l'anglais par le docteur C.-H. Gros, médecin en chef de l'hôpital de Boulogne-sur-Mer. Deuxième édition, revue et augmentée. 1 vol. in-18 jésus de 200 pages. 2 fr.

NOUVEAU DICTIONNAIRE
DE
MÉDECINE ET DE CHIRURGIE
PRATIQUES
ILLUSTRÉ DE FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE

RÉDIGÉ PAR

ANGER, E. BAILLY, BARRALLIER, BENI-BARDE, BERNUTZ, P. BERT, BŒCKEL, BUIGNET, CUSCO, DEMARQUAY, DENUCÉ, DESNOS, DESORMEAUX, A. DESPRÉS, DEVILLIERS, M. DUVAL, FERNET, Alf. FOURNIER, Ach. FOVILLE, T. GALLARD, E. GINTRAC, GOMBAULT, GOSSELIN, Alph. GUÉRIN, A. HARDY, HÉRAUD, HEURTAUX, HIRTZ, JACCOUD, JACQUEMET, JEANNEL, KŒBÉRLÉ, LAENNEC, LANNELONGUE, S. LAUGIER, LEDENTU, LÉPINE, P. LORAIN, LUMIER, LUTON, MARTINEAU, A. NÉLATON, Aug. OLLIVIER, ORÉ, PANAS, M. RAYNAUD, RICHET, Ph. RICORD, A. RIGAL, Jules ROCHARD, Z. ROUSSIN, SAINT-GERMAIN, Ch. SARAZIN, Germain SÉE, Jules SIMON, SIREDEY, STOLTZ, I. STRAUS, A. TARDIEU, S. TARNIER, TROUSSEAU, VALETTE, VERJON, A. VOISIN.

Directeur de la rédaction : le Dr JACCOUD.

Son titre suffit à indiquer à la fois son but, son esprit.

Son but. C'est de rendre service à tous les praticiens qui ne peuvent se livrer à de longues recherches faute de temps ou faute de livres, et qui ont besoin de trouver réunis et comme élaborés tous les faits qu'il leur importe de connaître bien ; c'est de leur offrir une grande quantité de matières sous un petit volume, et non pas seulement des définitions et des indications précises comme en présente le *Dictionnaire de Littré et Robin*, mais une exposition, une description détaillée et proportionnée à la nature du sujet et à son rang légitime dans l'ensemble et la subordination des matières.

Son esprit. Le *Nouveau Dictionnaire* ne sera pas une compilation des travaux anciens et modernes ; ce sera une analyse des travaux des maîtres français et étrangers, empreinte d'un esprit de critique éclairé et élevé ; ce sera souvent un livre neuf par la publication de matériaux inédits qui, mis en œuvre par des hommes spéciaux, ajouteront une certaine originalité à la valeur encyclopédique de l'ouvrage ; enfin ce sera surtout un livre pratique.

CONDITIONS DE LA SOUSCRIPTION

Le *Nouveau Dictionnaire de médecine et de chirurgie pratiques*, illustré de figures intercalées dans le texte, se composera d'environ 30 volumes grand in-8 cavalier de 800 pages.

Prix de chaque vol. de 800 pages, avec fig. intercalées dans le texte. 10 fr.

Les Tomes I à XXI *complets* sont en vente.—Il sera publié trois volumes par an.

Les volumes seront envoyés *franco* par la poste aussitôt leur publication aux souscripteurs des départements, sans augmentation sur le prix fixé.

On souscrit chez J.-B. Baillière et Fils, et chez tous les libraires des départements et de l'étranger.

LISTE DES AUTEURS

DU NOUVEAU DICTIONNAIRE DE MÉDECINE ET DE CHIRURGIE PRATIQUES

ANGER (Benj.), chirurgien des hôpitaux.
BARRALLIER, professeur à l'École de médecine navale de Toulon.
BENI-BARDE, médecin en chef de l'établissement hydrothérapique d'Auteuil.
BERNUTZ, médecin de l'Hôpital de la Pitié.
BERT (P.), professeur de physiologie à la Faculté des sciences de Paris.
BŒCKEL, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Strasbourg.
BUIGNET, professeur à l'École supérieure de pharmacie de Paris.
CUSCO, chirurgien de l'Hôpital Lariboisière.
DEMARQUAY, chirurgien de la Maison municipale de santé.
DENUCÉ, professeur de clinique chirurgicale à l'Ecole de médecine de Bordeaux.
DESNOS, médecin des Hôpitaux de Paris.
DESORMEAUX, chirurgien de l'Hôpital Necker.
DESPRÉS (A.), professeur agrégé de la Faculté de médecine, chirurgien des hôpitaux.
DEVILLIERS, membre de l'Académie de médecine.
DUVAL (M.), professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris.
FERNET (Ch.), professeur agrégé à la Faculté de médecine, médecin des hôpitaux.
FOURNIER (Alfred), professeur agrégé à la Faculté, médecin des Hôpitaux de Paris.
FOVILLE (Ach.), directeur de l'asile des aliénés de Quatre-Mare.
GALLARD (T.), médecin de l'Hôpital de la Pitié.
GINTRAC (Henri), professeur de clinique médicale à l'École de médecine de Bordeaux.
GOSSELIN, professeur à la Faculté de médecine de Paris, chirurgien de la Charité.
GUÉRIN (Alphonse), chirurgien de l'Hôpital Saint-Louis.
HARDY (A.), professeur à la Faculté de Paris, médecin de l'Hôpital Saint-Louis.
HERAUD, professeur de l'Ecole de médecine navale à Toulon.
HEURTAUX, professeur à l'Ecole de médecine de Nantes.
HIRTZ, professeur à la Faculté de médecine de Strasbourg.
JACCOUD, professeur agrégé à la Faculté de médecine, médecin des Hôpitaux de Paris.
JACQUEMET, professeur agrégé à la Faculté de Montpellier.
JEANNEL, pharmacien en chef de l'hôpital Saint-Martin, à Paris.
KŒBERLÉ, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Strasbourg.
LANNELONGUE, professeur agrégé de la Faculté de médecine, chirurgien des hôpitaux.
LAUGIER (S.), professeur à la Faculté de médecine, chirurgien de l'Hôtel-Dieu.
LEDENTU, professeur agrégé de la Faculté de médecine.
LÉPINE, médecin des Hôpitaux.
LORAIN (P.), professeur à la Faculté de médecine, médecin des Hôpitaux de Paris
LUNIER, inspecteur général des établissements d'aliénés.
LUTON, professeur à l'Ecole de médecine de Reims.
MARTINEAU, médecin des hôpitaux
OR., professeur à l'École de médecine de Bordeaux.
PANAS, professeur agrégé à la Faculté de médecine, chirurgien des Hôpitaux.
RAYNAUD (Maurice), médecin des Hôpitaux, agrégé à la Faculté de médecine.
RICHET, professeur à la Faculté de Paris, chirurgien de l'Hôtel-Dieu.
RICORD (Ph.), membre de l'Académie de médecine, ex-chirurgien de l'Hôpital du Midi.
RIGAL (A.), professeur agrégé à la Faculté de médecine.
ROCHARD (Jules), directeur du service de santé de la marine au port de Brest.
ROUSSIN (Z.), professeur agrégé à l'École du Val-de-Grâce.
SAINT-GERMAIN, chirurgien des Hôpitaux.
SARAZIN (Ch.), professeur agrégé à la Faculté de Strasbourg.
SÉE (Germain), professeur à la Faculté de médecine, médecin de la Charité.
SIMON (Jules), médecin des Hôpitaux de Paris.
SIREDEY, médecin des Hôpitaux.
STOLTZ, professeur d'accouchements à la Faculté de médecine de Strasbourg.
STRAUS (I.), chef de clinique médicale à la Faculté de médecine.
TARDIEU (Amb.), professeur de la Faculté de médecine de Paris, médecin de l'Hôtel-Dieu, membre de l'Académie de médecine.
TARNIER (S.), professeur agrégé à la Faculté de Paris, chirurgien des Hôpitaux.
TROUSSEAU, professeur de clinique médicale à la Faculté de médecine de Paris.
VALETTE, professeur de clinique chirurgicale à l'École de médecine de Lyon.
VOISIN (Auguste), médecin de la Salpêtrière.

PRINCIPAUX ARTICLES

DES VINGT-ET-UN PREMIERS VOLUMES

TOME PREMIER (812 pages avec 36 figures).

Articles.	MM.	Articles.	MM.
INTRODUCTION	Jaccoud.	**ACCOUCHEMENT**	Stoltz, Lorain.
ABDOMEN	Denucé, Bernutz.	**AGONIE**	Jaccoud.
ABSORPTION	Bert.	**ALBUMINURIE**	Jaccoud.

TOME II (800 pages avec 60 figures).

ANÉVRYSMES	Richet.	**ANUS**	Gosselin, Giraldès, Laugier.
ANGINE DE POITRINE	Jaccoud.		

TOME III (824 pages avec 75 figures).

APHRODISIAQUES	Ricord.	**ARTICULATIONS**	Panas.
APOPLEXIE	Jaccoud.	**ASTHME**	G. Sée.
ARTÈRES	Nélaton, M. Raynaud.	**ATAXIE LOCOMOTRICE**	Trousseau.

TOME IV (800 pages avec 80 figures).

AUSCULTATION	Luton	**BEC-DE-LIÈVRE**	Demanquay.

TOME V (812 pages avec 60 figures).

BILE	Jaccoud.	**BRONZEE** (Maladie)	Jaccoud.
BILIAIRES (Voies)	Luton.	**BUBON**	A. Fournier.
BLENNORRHAGIE	A. Fournier.		

TOME VI (832 pages avec 175 figures).

CANCER, CANCROIDE	Heurtaux	**CÉSARIENNE** (Opération)	Stoltz.
CAROTIDES	Richet.	**CHALEUR**	Buignet, Bert et [illegible]

TOME VII (775 pages avec 93 figures).

CHAMPIGNONS	Marchand et Roussin.	**CHOLÉRA**	Desnos, Lorain et [illegible]
CHANCRE	Fournier.	**CIRCULATION**	Luton.

TOME VIII (802 pages avec 81 figures).

CLAVICULE	Richet et Després.	**CŒUR**	Luton et Maur. [illegible]
CLIMAT	Rochard.	**COMMOTION**	Laugier.

TOME IX (820 pages avec 84 figures).

CONJONCTIVE	Gosselin.	**COUDE**	Denucé.

TOME X (780 pages avec 122 figures).

COXALGIE. . . . . VALETTE.
CROUP. . . . . SIMON.
CRURAL. . . . . GOSSELIN.
DARTRE. . . . . HARDY.

TOME XI (796 pages avec 49 figures).

DENT . . . . . SARAZIN.
DIABÈTE. . . . . JACCOUD.
DIGESTION. . . . . BERT.
DYSENTERIE. . . . . BARRALLIER.

TOME XII (820 pages avec 110 figures).

EAU, EAUX MINÉRALES BUIGNET, VERJON et TARDIEU.
ÉLECTRICITÉ. . . . . BUIGNET, JACCOU

TOME XIII (800 pages avec 80 figures).

ENCÉPHALE. . . . LAUGIER et JACCOUD.
ENDOCARDE. . . . . JACCOUD.
ENTOZOAIRES. . . . L. VAILLANT e LUTON.

TOME XIV (780 pages avec 68 figures).

ÉRYSIPÈLE. . . M. RAYNAUD et GOSSELIN.
FACE . . . . . LEDENTU, GINTRAC.
FER . . . . . BUIGNET et HIRTZ
FIÈVRE. . . . . HIRTZ.

TOME XV (786 pages avec 121 figures).

FOIE. . . . . J. SIMON.
FOLIE . . . FOVILLE, TARDIEU et LUNIER.
FORCEPS. . . . . TARNIER.
FRACTURE. . . . . VALETTE.
GÉNÉRATION. . . . . M. DUVAL.

TOME XVI (754 pages avec 41 figures).

GENOU. . . . . PANAS.
GÉOGRAPHIE MÉDICALE H. REY.
GLAUCOME. . . . . CUSCO et ARADIE
GOITRE. . . . . LUTON.

TOME XVII (800 pages avec 99 figures).

GROSSESSE. . . . . STOLTZ.
HÉRÉDITÉ. . . . . A. VOISIN.
HERNIE. . . . . LEDENTU.
HISTOLOGIE. . . . . DUVAL.

TOME XVIII (844 pages avec 44 figures).

HYDROTHÉRAPIE. . . . BENI BARDE.
ICTÈRE. . . . . JULES SIMON.
INFANTICIDE. . . . . TARDIEU
INFLAMMATION. . . . HEURTAUX.

TOME XIX (776 pages avec 101 figures).

INOCULATION. . . . . A. FOURNIER.
INTERMITTENTE (fièvre) HIRTZ.
INTESTIN. . . . . LUTON et DESPRÉS.
JAMBE. . . . . PONCET et CHAUVEL.

TOME XX (800 pages avec 100 figures).

LANGUE. . . . . DEMARQUAY.
LARYNX. . . . . BECKEL.
LEUCOCYTHÉMIE. . . JACCOUD.
LEUCORRHÉE. . . . . STOLTZ.
LITHOTRITIE. . . . . DEMARQUAY.
LUXATIONS. . . . . VALETTE.

TOME XXI (800 pages avec 80 figures).

LYMPHATIQUE. . . LEDENTU et LONGUET.
MACHOIRES. . . . . A. DESPRÉS.
MAIN. . . . . LEDENTU et DUVAL.
MALADIE. . . . . M. RAYNAUD.
MAMELLE. . . . . LANNELONGUE.
MECONIUM. . . . . DEVILLIERS.

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIERE ET FILS

ANDOUARD. Nouveaux éléments de pharmacie, par Andouard, professeur à l'Ecole de médecine de Nantes. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de 880 p. avec 120 figures. . . . . 14 fr.

ANGER. Nouveaux éléments d'anatomie chirurgicale, par Benjamin Anger, chirurgien des hôpitaux, professeur agrégé à la Faculté de médecine. Paris, 1869. 1 vol. grand in-8 de xvi-1056 pages, avec 1079 figures et Atlas in-4 de 12 planches gravées et coloriées, et représentant les régions de la tête, du cou, de la poitrine, de l'abdomen, de la fosse iliaque interne, du périnée et du bassin. . . . . 40 fr.
Séparément, le texte, 1 vol. in-8. . . . . 20 fr.
Séparément, l'Atlas, 1 vol. in-4. . . . . 25 fr.

ANGLADA. Études sur les maladies nouvelles et les maladies éteintes, pour servir à l'histoire des évolutions séculaires de la pathologie, par Ch. Anglada, professeur de la Faculté de médecine de Montpellier. Paris, 18 9. 1 vol. in-8 de 700 pages. . . . . 8 fr.

ANNALES D'HYGIÈNE PUBLIQUE ET DE MÉDECINE LÉGALE, par MM. Andral, Beaugrand, Bergeron, Brierre de Boismont, Chevallier, L. Colin, Delpech, Devergie, Fonssagrives, Gallard, Gauchet, Gaultier de Claubry, G. Lagneau, de Pietra-Santa, Proust, Roussin, Ambr. Tardieu, Vernois, avec une revue des travaux français et étrangers, par MM. O. Du Mesnil et Strohl.
Paraissant tous les 3 mois par cahiers de 15 feuilles in-8, avec pl.
Prix de l'abonnement annuel pour Paris. . . . . 20 fr.
Pour les départements. . . . . 22 fr.
Pour l'étranger suivant les conventions postales.
La première série, collection complète (1829 à 1853), dont il ne reste que peu d'exemplaires, 50 vol. in-8, figures. . . . . 450 fr.
Tables alphabétiques par ordre des matières et des noms d'auteurs des Tomes I à L (1829 à 1853). Paris, 1855. In-8 de 136 pages à 2 col. 3 fr. 50
Chacune des dernières années séparément, jusqu'à 1871 inclus. 18 fr.
— Depuis 1872. . . . . 20 fr.
La seconde série a commencé avec le cahier de janvier 1854.
On ne vend pas séparément : 1re *série*, tomes I et II (1829), tomes XI et XII (1834), tomes XV et XVI (1836). — 2e *série*, tomes XI et XII (1859), tomes XIII et XIV (1860).

ANNUAIRE PHARMACEUTIQUE, ou Exposé analytique des travaux de pharmacie, physique, histoire naturelle pharmaceutique, hygiène, toxicologie et pharmacie légale, fondé par O. Reveil et L. Parisel, continué par C. Méhu, pharmacien en chef de l'hôpital Necker. Paris, 1863-1874. 11 vol. in-18, de chacun 360 pag., avec fig. Prix de chacun. 1 fr. 50

BARELLA. Quelques considérations pratiques sur le diagnostic et le traitement des maladies organiques du cœur. Bruxelles, 1872. 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.

BARRAULT (E.). **Parallèle des eaux minérales de France et d'Allemagne.** Guide pratique du médecin et du malade, avec une introduction par le docteur Durand-Fardel. Paris, 1872. In-18 de xxii-372 p. 3 fr. 50

BEALE. De l'Urine, des dépôts urinaires et des calculs, de leur composition chimique, de leurs caractères physiologiques et pathologiques et des indications thérapeutiques qu'ils fournissent dans le traitement des maladies. Traduit de l'anglais et annoté par MM. Auguste Ollivier, médecin des hôpitaux, et G. Bergeron, professeur agrégé de la Faculté de médecine. Paris, 1865. 1 vol. in-18, 40 p. avec 136 figures. . . 7 fr.

BEAUMONT (Élie de). Leçons de Géologie pratique, professées au Collége de France. Paris, 1845-1869. 2 vol. in-8 avec planches. . . 14 fr.
Séparément. Tome II, 1869. . . . . 5 fr.

BEAUNIS. Nouveaux éléments de physiologie humaine, comprenant les principes de la physiologie comparée et de la physiologie générale, par H. Beaunis, professeur de physiologie à la Faculté de médecine de Nancyr Paris, 1876. 1 vol. in 8 de 1100 pages avec 350 fig. Cart. . . . . 14 fr.

BEAUNIS et BOUCHARD. Nouveaux éléments d'anatomie descriptiv. et d'embryologie, par H. Beaunis, professeur à la Faculté de médecine de Nancy, et H. Bouchard, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Nancy. *Deuxième édition*. Paris, 1875. 1 v. grand in-8 de 1104 pages avec 421 figures. Cart. . . . . 18 fr.

BEAUREGARD. Des difformités des doigts (dactylolyses). Dactylolyses essentielles (ainhum) dactylolyse de cause interne et de cause externe. Étude de séméiologie par le docteur G. Beauregard (du Havre). Paris, 1875. 1 vol. in-8 de 110 pages, avec 6 planches. . . . . 4 fr.

BECLU (H.). Nouveau manuel de l'herboriste ou traité des propriétés médicinales des plantes exotiques et indigènes du commerce, suivi d'un Dictionnaire pathologique, thérapeutique et pharmaceutique. 1872. 1 vol. in-12 de xiv-256 pages, avec 55 figures. . . . . 2 fr. 50

BERGERET (L.-F.). Des fraudes dans l'accomplissement des fonctions génératrices, causes, dangers et inconvénients pour les individus, la famille et la société, remèdes, par L. F. Bergeret, médecin en chef de l'hôpital d'Arbois (Jura). *Quatrième édition*. Paris, 1874. 1 vol. in-18 jésus de 228 pages. . . . . 2 fr. 50

— **De l'abus des boissons alcooliques**, dangers et inconvénients pour les individus, la famille et la société. Moyens de modérer les ravages de l'ivrognerie. Paris, 1870. In-18 jésus de VIII-380 pages. . . . . 3 fr.

BERNARD (Claude). Leçons de Physiologie expérimentale appliquée à la médecine, faites au Collége de France, par Cl. Bernard, membre de l'Institut de France, professeur au Collége de France, professeur au Muséum d'histoire naturelle. Paris, 1855-1856. 2 vol. in-8, avec fig. 14 fr.

— **Leçons sur les effets des substances toxiques et médicamenteuses.** Paris, 1857. 1 vol. in-8, avec 52 figures. . . . . 7 fr.

— **Leçons sur la physiologie et la pathologie du système nerveux.** Paris, 1858. 2 vol. in-8, avec figures. . . . . 14 fr.

— **Leçons sur les propriétés physiologiques et les altérations pathologiques des liquides de l'organisme.** Paris, 1859. 2 vol. in-8, av. fig. 14 fr.

— **Introduction à l'étude de la médecine expérimentale.** Paris, 1865. In-8, 400 pages. . . . . 7 fr.

— **Leçons de pathologie expérimentale.** Paris, 1871. 1 vol. in-8 de 600 pages. . . . . 7 fr.

— **Leçons sur les anesthésiques et sur l'asphyxie.** Paris, 1875. 1 vol. in-8 de 520 pages avec figures. . . . . 7 fr.

— **Leçons sur la chaleur animale**, sur les effets de la chaleur et sur la fièvre. Paris, 1876. In-8 de 469 pages, avec fig. . . . . 7 fr.

BERNARD (Claude) et HUETTE. Précis iconographique de médecine opératoire et d'anatomie chirurgicale, par Claude Bernard et Ch. Huette (de Montargis). *Nouveau tirage*. Paris, 1873. 1 vol. in-18 jésus, avec 113 planches, figures noires. Cartonné. . . . . 24 fr.

— Le même, figures coloriées . . . . . 48 fr.

BERNARD (H.). Premiers secours aux blessés sur le champ de bataille et dans les ambulances, par le docteur H. Bernard, ancien chirurgien des armées, précédée d'une introduction par J. N. Demarquay, chirurgien de la Maison municipale de santé. Paris, 1870. In-18 de 164 p. avec 79 figures. . . . . 2 fr.

BERT (Paul). Leçons sur la physiologie comparée de la respiration, par Paul Bert, professeur à la Faculté des sciences. Paris, 1870. 1 vol. in-8 de 500 pages avec 150 fig. . . . . 10 fr.

BLANCHARD. Les poissons des eaux douces de la France. Anatomie, physiologie, description des espèces, mœurs, instincts, industrie, commerce, ressources alimentaires, pisciculture, législation concernant la pêche, par Émile Blanchard, membre de l'Institut, professeur au Muséum d'histoire naturelle. Paris, 1866. 1 magnifique volume, grand in-8, avec 151 figures dessinées d'après nature. . . . . 12 fr.

BOISSEAU Des maladies simulées et des moyens de les reconnaître. par le docteur Edm. Boisseau, professeur agrégé. Paris, 1870. 1 vol. in-8 de 500 pages. . . . . 7 fr.

BOIVIN et DUGÈS. Anatomie pathologique de l'utérus et de ses annexes, fondée sur un grand nombre d'observations classiques ; par madame Boivin, docteur en médecine, sage-femme en chef de la Maison de santé, et A. Dugès, professeur à la Faculté de médecine de Montpellier. Paris. 1866. Atlas in-folio de 41 planches, gravées et coloriées, *représentant les principales altérations morbides des organes génitaux de la femme*, avec explication. . . . . 45 fr.

BONNAFONT. Traité théorique et pratique des maladies de l'oreille et des organes de l'audition, par le docteur J. B. Bonnafont. *Deuxième édition.* Paris, 1873. 1 vol in-8, xvi-700 pages, avec 45 figures. 10 fr.

BONNET. Traité de thérapeutique des Maladies articulaires, Paris, 1853. 1 vol. in-8, xviii-684 pages, avec 97 figures. . . . . 9 fr.

— **Nouvelles méthodes de traitement des Maladies articulaires.** *Seconde édition*, revue et augmentée d'une notice historique, par le docteur Garin, médecin de l'Hôtel-Dieu de Lyon, accompagnée d'observations sur la rupture de l'ankylose, par MM. Barrier, Berne, Philipeaux et Bonnet. Paris, 1860, in-8 de 356 pages, avec 17 figures. . . . . 4 fr. 50

BOUCHUT. Traité pratique des Maladies des nouveau-nés, des enfants à la mamelle et de la seconde enfance, par le docteur E. Bouchut, médecin de l'hôpital des Enfants malades, professeur agrégé à la Faculté de médecine. *Sixième édition*, corrigée et augmentée. Paris, 1873. 1 vol. in-8 de viii-1092 pages, avec 179 figures. . . . . 16 fr.

Ouvrage couronné par l'Institut de France (Académie des sciences).

Après une longue pratique et plusieurs années d'enseignement clinique à l'hôpital des Enfants de Sainte-Eugénie, M. Bouchut, pour répondre à la faveur publique, a étendu son cadre et complété son œuvre, en y faisant entrer indistinctement toutes les maladies de l'enfance jusqu'à la puberté. On trouvera dans son livre la médecine et la chirurgie du premier âge.

— **Hygiène de la Première Enfance**, guide des mères pour l'allaitement, le sevrage et le choix de la nourrice, chez les nouveau-nés. *Sixième édition*, revue et augmentée. Paris, 1874. In-18 de viii-523 pages, avec 49 figures. . . . . 4 fr.

— **Nouveaux éléments de Pathologie générale, de Sémiologie et de diagnostic**, comprenant : la nature de l'homme, l'histoire générale de la maladie, les différentes classes de maladies, l'anatomie pathologique générale, de l'histologie pathologique, le pronostic, la thérapeutique générale, les éléments du diagnostic par l'étude des symptômes et l'emploi des moyens physiques (auscultation, percussion, cérébroscopie, laryngoscopie, microscopie, chimie pathologique, spirométrie, etc.). *Troisième édition*. Paris, 1875. 1 vol. grand in-18 de 1512 pages avec 300 figures, cartonné en toile. . . . . 20 fr.

— **Traité des signes de la mort, et des moyens ne pas être enterré vivant**. *Deuxième édition*, augmentée d'une étude sur de nouveaux signes de la mort. Paris, 1874. 1 vol. in-18 jésus de viii-468 p. 4 fr.

BOUCHUT. De l'État nerveux aigu et chronique, ou Nervosisme, appelé névropathie aiguë cérébro-pneumogastrique, diathèse nerveuse, fièvre nerveuse, cachexie nerveuse, névropathie protéiforme, névrospasmie; et confondu avec les vapeurs, la surexcitabilité nerveuse, l'hystéricisme, l'hystérie, l'hypochondrie, l'anémie, la gastralgie, etc. Paris, 1860. 1 vol in-8. 348 pages. . . . . 5 fr.

BOURGEOIS (L. X.). Les passions dans leurs rapports avec la santé et les maladies, par le docteur X. Bourgeois, lauréat de l'Académie de médecine de Paris. — **L'amour et le libertinage**. *Troisième édition* augmentée. Paris, 1871. 1 vol. in-12 de 208 pages. . . . . 2 fr.

BOURGEOIS (L. X.). De l'influence des maladies de la femme pendant la grossesse sur la constitution et la santé de l'enfant, par M. le docteur L. X. Bourgeois, médecin à Tourcoing. Paris, 1861. 1 vol. in-4. 5 fr. 50

BOURGUIGNAT (J. R.). Les Spiciléges malacologiques. Paris, 1862. 1 vol. in-8, avec 15 planches en partie coloriées. . . . . 25 fr.

Cet important ouvrage comprend 15 monographies : 1° genre Choanomphalus; catalogue des Paludinées recueillies en Sibérie et sur le territoire de l'Amour; 3° Limaciens; 4° Limaces algériennes; 5° Parmacella; 6° genre Testacella; 7° genre Pyrgula; 8° genre Gundlachia; 9° genre Poeyia; 10° genre Brondelia; 11° Limaces d'Europe; 12° Paludinées de l'Algérie; 13° et 14° Vivipara; 15° genre Ancylus.

BRAIDWOOD (P. M.). De la Pyohémie ou fièvre suppurative, traduction par Edw. Alling, revue par l'auteur. Paris, 1870. 1 vol. in-8 de 300 pages avec, 12 planches chromo-lithographiées. . . . . 8 fr.

BRAUN, BROUWERS et DOCX. Gymnastique scolaire en Hollande, en Allemagne et dans les pays du Nord, par MM. Braun, Brouwers et Docx, suivie de l'état de l'enseignement de la gymnastique en France. Paris, 1874. In-8 de 168 pages. . . . . 3 fr. 50

BREHM. La vie des animaux illustrée, ou description populaire du règne animal, par A. E. Brehm. Édition française, revue par Z. Gerbe. Caractères, mœurs, instincts, habitudes et régime, chasses, combats, captivité, domesticité, acclimatation, usages et produits.

— **Les Mammifères**. 2 vol. grand in-8 avec 800 figures et 40 planches, broché. . . . . 21 fr.

— Cartonné en toile, doré sur tranches, avec fers spéciaux. . . . 28 fr.

— Relié en demi-maroquin, doré sur tranches. . . . . 30 fr.

— **Les Oiseaux**. 2 vol. grand in-8, avec 700 fig. et 40 pl. broché. 21 fr.

— Cartonné en toile, doré sur tranches, fers spéciaux. . . . . 28 fr.

— Relié en demi-maroquin, doré sur tranches. . . . . 30 fr.

BRIAND et CHAUDÉ. Manuel complet de Médecine légale, ou Résumé des meilleurs ouvrages publiés jusqu'à ce jour sur cette matière, et des jugements et arrêts les plus récents, par J. Briand, docteur en médecine de la Faculté de Paris, et Ernest Chaudé, docteur en droit, et contenant un *Traité élémentaire de chimie légale*, par J. Bouis, professeur agrégé de toxicologie à l'École de pharmacie de Paris. *Neuvième édition*. Paris, 1875. 1 vol. grand in-8 de VIII-1088 pages, avec 5 planches gravées et 37 figures. . . . . 18 fr.

BRUCKE. Des couleurs au point de vue physique, physiologique, artistique et industriel, par le docteur Ernest Brucke, professeur à l'Université de Vienne, membre de l'Académie des sciences et du Conseil du musée pour l'art et l'industrie, traduit de l'allemand sous les yeux de l'auteur, par P. Schutzenberger. Paris, 1866. In-18 jésus, 344 pages avec 46 figures. . . . . 4 fr.

CAUVET. Nouveaux éléments d'histoire naturelle médicale, par D. Cauvet, professeur à l'École supérieure de pharmacie de Nancy. Paris, 1869. 2 vol. in-18 jésus d'environ 600 pages, avec 790 figures. . . 12 fr.

CHAILLY. Traité pratique de l'Art des accouchements, par Chailly-Honoré, membre de l'Académie de médecine, ancien chef de clinique de la Clinique d'accouchements à la Faculté de médecine de Paris. *Cinquième édition*, revue et corrigée. Paris, 1867. 1 vol. in-8 de XXIV-1056 pages, avec 1 pl. et 282 figures. . . . . 10 fr.

Ouvrage adopté par le Conseil de l'instruction publique pour les facultés de médecine, les écoles préparatoires et les cours départementaux institués pour les sages-femmes.

CHANTREUIL. Les dispositions du cordon (la procidence excepté) qui peuvent troubler la marche régulière de la grossesse et de l'accouchement par G. Chantreuil, professeur agrégé de la Faculté de médecine de Paris, 1875. in-8 de 176 pages. . . . . 4 fr.

CHAUVEAU. Traité d'anatomie comparée des animaux domestiques, 2e édition, revue et augmentée avec la collaboration de M. Arloing. Paris, 1871. 1 vol. in-8 avec 568 figures. . . . . 20 fr.

CHEVREUL. Des couleurs et de leurs applications aux arts industriels à l'aide des cercles chromatiques, par M. E. Chevreul, membre de l'Académie des sciences, professeur au Muséum, directeur de la manufacture des Gobelins. Paris, 1864. Petit in-folio, avec 27 planches gravées sur acier et imprimées en couleur par M. René Digeon, cart. en toile. 55 fr.

CHOSSAT. Étude sur les conditions pathogéniques des œdèmes, par le docteur Théodore Chossat (de Genève), aide de clinique de la Faculté de Paris au laboratoire de l'Hôtel-Dieu Paris, 1874. In-8 de 135 p. 3 fr.

CHURCHILL. Traité pratique des maladies des femmes, hors l'état de grossesse, pendant la grossesse et après l'accouchement, par Fleetwood Churchill, professeur d'accouchements, de maladies des femmes et des enfants, à l'Université de Dublin. Traduit de l'anglais par les docteurs Wieland et Dubrisay. *Deuxième édition* contenant l'exposé des travaux français et étrangers les plus récents, par le Dr Leblond. Paris, 1874. 1 vol. grand in-8 de 1258 p., avec 339 figures. . . . . 18 fr.

CIVIALE. Traité pratique sur les Maladies des Organes génito-urinaires, par le docteur Civiale, membre de l'Institut et de l'Académie de médecine. *Troisième édition*, augmentée. Paris, 1858-1860. 3 vol. in-8, avec figures. . . . . 24 fr.

Cet ouvrage, le plus pratique et le plus complet sur la matière, est ainsi divisé : Tome I. Maladies de l'urèthre. — Tome II. Maladies du col de la vessie et de la prostate. — Tome III. Maladies du corps de la vessie.

CODEX medicamentarius. Pharmacopée française rédigée par ordre du gouvernement, la commission de rédaction étant composée de professeurs de la Faculté de médecine et de l'École supérieure de pharmacie de Paris, et de membres de l'Académie de médecine et de la Société de pharmacie de Paris. Paris, 1866. 1 fort vol. grand in-8, cartonné à l'anglaise. . . . . 9 fr. 50

Franco par la poste. . . . . 11 fr. 50

— Le même, interfolié de papier réglé et solidement relié en demi-maroquin. . . . . 16 fr. 50

Le nouveau Codex medicamentarius, Pharmacopée française, édition de 1866, sera et demeurera obligatoire pour les pharmaciens à partir du 1er janvier 1867. (*Décret du 5 décembre 1866.*)

Commentaires thérapeutiques du Codex. Voy. Guibler, page 18.

COLIN (G.) Traité de physiologie comparée des animaux, considérée dans ses rapports avec les sciences naturelles, la médecine, la zootechnie et l'économie rurale, par G. Colin, professeur à l'école vétérinaire d'Alfort. *Deuxième édition*. Paris, 1871-72. 2 vol. in-8 avec 250 figures. 26 fr.

COLIN (Léon). Traité des fièvres intermittentes, par Léon Colin, professeur à l'École du Val-de-Grâce. Paris, 1870. 1 vol. in-8 de 500 pages, avec un plan médical de Rome. . . . . 8 fr.

COLIN (Léon). De la Variole, au point de vue épidémiologique et prophylactique, Paris, 1873. 1 vol. in-8 de 200 pages avec 3 figures. 3 fr. 50

COMITÉ consultatif d'Hygiène publique de France (Recueil des travaux et des actes officiels de l'Administration sanitaire), publié par ordre de M. le Ministre de l'agriculture et du commerce. Paris, 1872. Tome I. 1 vol. in-8 de XXIV-451 pages . . . . . 8 fr.
— Tome II. Paris, 1873. 1 vol. in-8 de 432 pages avec 2 cartes. . 8 fr.
— Tome II, 2e partie, contenant l'Enquête sur le goître et le crétinisme. Rapport par M. BAILLARGER. Paris, 1875. 1 vol. in-8 de 376 pages, avec 3 cartes (pas séparément de la collection) . . . . . 7 fr.
— Tome III. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de 404 pages. . . . . 8 fr.
— Tome IV. Paris, 1875. 1 vol in-8 avec cartes. . . . . 8 fr.

COMTE (A.). Cours de philosophie positive, par AUGUSTE COMTE, répétiteur d'analyse transcendante et de mécanique rationnelle à l'École polytechnique. *Troisième édition*, augmentée d'une préface par E. LITTRÉ, et d'une table alphabétique des matières. Paris, 1869. 6 vol. in-8. . . . 45 fr.

Tome I. Préliminaires généraux et philosophie mathématique. — Tome II. Philosophie astronomique et philosophie physique.— Tome III. Philosophie chimique et philosophie biologique. — Tome IV. Philosophie sociale (partie dogmatique). — Tome V. Philosophie sociale (partie historique : état théologique et état métaphysique). — Tome VI. Philosophie sociale (complément de la partie historique, et Conclusions générales.

— **Principes de philosophie positive**, précédés de la préface d'un disciple, par E. LITTRÉ. Paris, 1868. 1 vol. in-18 jésus, 208 pag. . . 2 fr. 50

Les *Principes de philosophie positive* sont destinés à servir d'introduction à l'étude du *Cours de philosophie*, ils contiennent : 1° l'exposition du but du cours, ou considérations générales sur la nature et l'importance de la philosophie positive; 2° l'exposition du plan du cours, ou considérations générales sur la hiérarchie des sciences.

CONTEJEAN. Éléments de géologie et de paléontologie, par CONTEJEAN, professeur d'histoire naturelle à la Faculté des sciences de Poitiers. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de 750 pages, avec 467 figures. Cartonné. 16 fr.

CORLIEU (A.). Aide-mémoire de médecine, de chirurgie et d'accouchements, vade-mecum du praticien, par le docteur A. CORLIEU. *Deuxième édition*. Paris, 1872. 1 vol. in-18 jésus de 700 pages avec 418 fig. Cart.. . . . . 6 fr.

CORRE. La pratique de la chirurgie d'urgence, par le docteur A. CORRE, ex-médecin de 1re classe de la marine. Paris, 1872. In-18 de VIII-216 p., avec 51 figures.. . . . . 2 fr.

CROS. Les fonctions supérieures du système nerveux, recherche des conditions organiques et dynamiques de la pensée, par le docteur A. CROS. Paris. 1875. 1 vol. in-8 de 545 pages. . . . . 8 fr.

CRUVEILHIER. Anatomie pathologique du Corps humain, ou Descriptions, avec figures lithographiées et coloriées, des diverses altérations morbides dont le corps humain est susceptible; par J. CRUVEILHIER, professeur d'anatomie pathologique à la Faculté de médecine de Paris, médecin de l'hôpital de la Charité, président perpétuel de la Société anatomique, etc. Paris, 1830-1842. 2 vol. in-folio, avec 250 pl. col. 456 fr.

Demi-reliure, dos de maroquin, non rognés. Prix pour les 2 vol. grand in-folio.. . . . . 24 fr.

Ce bel ouvrage est complet; il a été publié en 41 livraisons, chacune contenant 6 feuilles de texte in-folio grand raisin vélin, caractère neuf de F. Didot, avec 5 pl. coloriées avec le plus grand soin, et 6 planches lorsqu'il n'y a que 4 planches d'coloriées. Chaque livraison. . . . . 11 fr.

CRUVEILHIER. Traité d'Anatomie pathologique générale, par J. Cruveilhier, professeur d'anatomie pathologique à la Faculté de médecine de Paris. *Ouvrage complet*. Paris, 1849-1864. 5 vol. in-8. . . . . 55 fr.

Tome V et dernier, dégénérations aréolaires et gélatiniformes, dégénérations cancéreuses proprement dites, par J. Cruveilhier; pseudo-cancers et tables alphabétiques, par Ch. Houel. Paris, 1864. 1 vol. in-8 de 420 pag. . . . . 7 fr.

Cet ouvrage est l'exposition du Cours d'anatomie pathologique que M. Cruveilhier fait à la Faculté de médecine de Paris. Comme son enseignement, il est divisé en XVIII classes, savoir : Tome Ier, 1e solutions de continuité; 2e adhésions; 3e luxations; 4e invaginations; 5e hernies; 6e déviations. — Tome II, 7e corps étrangers; 8e rétrécissements et oblitérations; 9e lésions de canalisation par communication accidentelle; 10e dilatations. — Tome III, 11e hypertrophies; 12e atrophies; 13e métamorphoses et productions organiques analogues. — Tome IV, 14e hydropisies et flux; 15e hémorrhagies; 16e gangrènes; 17e inflammations ou phlegmasies. — Tome V, 18e dégénérations organiques.

CURTIS. Du traitement des rétrécissements de l'urèthre par la dilatation progressive, par le docteur T. B. Curtis. Paris, 1873, in-8 de 113 pages. . . . . 2 fr. 50

CUVIER (G.). Les Oiseaux, décrits et figurés d'après la classification de Georges Cuvier, mise au courant des progrès de la science. Paris, 1870, 1 vol. in-8 avec 72 planches contenant 464 fig. noires, 30 fr. Figures coloriées. . . . . 50 fr.

— **Les Mollusques**, Paris, 1868. 1 vol. in-8 avec 36 pl. contenant 520 figures noires, 15 fr.; fig. coloriées. . . . . 25 fr.

— **Les Vers et les Zoophytes**. Paris. 1869. 1 vol. in-8 avec 37 planches, contenant 550 figures. — Fig. noires, 15 fr.; fig. color. . . . . 25 fr.

CYON. Principes d'électrothérapie, par le docteur Cyon, professeur à l'Académie médico-chirurgicale de Saint-Pétersbourg. Paris, 1873. 1 vol. in-8 de VIII-275 pages avec figures. . . . . 4 fr.

CZERMAK. Du laryngoscope et de son emploi en physiologie et en médecine, par le docteur J. N. Czermak, professeur de physiologie à l'Université de Pesth. Paris, 1860, in-8, avec 2 pl. grav. et 31 fig. 3 fr. 50

DALTON. Physiologie et hygiène des écoles, des colléges et des familles, par Dalton, professeur à l'Université de New-York. Traduit par le docteur E. Acosta. Paris, 1870. 1 vol. in-18 jésus de 500 pages, avec 66 figures. . . . . 4 fr.

DAREMBERG. Histoire des sciences médicales, comprenant l'anatomie, la physiologie, la médecine, la chirurgie et les doctrines de pathologie générale, par Ch. Daremberg, professeur à la Faculté de médecine, membre de l'Académie de médecine, bibliothécaire de la bibliothèque Mazarine, etc. Paris, 1870. 2 vol. in-8. . . . . 20 fr.

DAVASSE. La Syphilis, ses formes, son unité, par J. Davasse, ancien interne des hôpitaux de Paris. Paris, 1865. 1 vol. in-8, 570 pag. 8 fr.

DEGLAND et GERBE. Ornithologie européenne, ou Catalogue descriptif, analytique et raisonné des oiseaux observés en Europe, par Degland et Z. Gerbe, préparateur du Cours d'Embryogénie au Collége de France. *Deuxième édition* entièrement refondue. Paris, 1867. 2 vol. in-8. . 24 fr.

DESHAYES (G.-P.) **Conchyliologie de l'île de la Réunion** (Bourbon). Paris, 1863. Gr. in-8, 144 pages, avec 14 planches coloriées. . . 10 fr.

— **Description des Animaux sans vertèbres découverts dans le bassin de Paris**, pour servir de supplément à la Description des co-

quilles fossiles des environs de Paris, comprenant une revue générale de toutes les espèces actuellement connues; par G. P. Deshayes, professeur au Muséum d'histoire naturelle. Paris, 1860-1866. *Ouvrage complet.* 3 vol. in-4 de texte et 2 vol. in-4 de 196 planch., publié en 50 livraisons. Prix de chaque livrais. 5 fr. — Prix de l'ouvrage complet. . . 250 fr.

Dictionnaire général des Eaux minérales et d'Hydrologie médicale, comprenant la géographie et les stations thermales, la pathologie thérapeutique, la chimie analytique, l'histoire naturelle, l'aménagement des sources, l'administration thermale, etc., par MM. Durand-Fardel, inspecteur des sources d'Hauterive à Vichy, E. Le Bret, inspecteur des eaux minérales de Baréges, J. Lefort, pharmacien, avec la collaboration de M. Jules François, ingénieur en chef des mines, pour les applications de la science de l'ingénieur à l'hydrologie médicale. Paris, 1860. 2 forts volumes in-8 de chacun 750 pages . . . . . 20 fr.

Ouvrage couronné par l'Académie de médecine.

Dictionnaire de Médecine, de Chirurgie, de Pharmacie, de l'Art vétérinaire et des Sciences qui s'y rapportent, publié par J.-B. Baillière et Fils. *Treizième édition*, entièrement refondue par E. Littré, membre de l'Institut de France (Académie française et Académie des inscriptions), et Ch. Robin, professeur à la Faculté de médecine de Paris, membre de l'Académie de médecine. Ouvrage contenant la synonymie *grecque, latine, allemande, anglaise, italienne et espagnole* et le Glossaire de ces diverses langues. Paris, 1873. 1 beau volume grand in-8 de 1,700 pag. à deux colonnes, avec plus de 550 figures. . . . . 20 fr.

Demi-reliure maroquin plats en toile . . . . . 4 fr.

Demi-reliure maroquin à nerfs, plats en toile, très-soignée. . . . 5 fr.

Il y a plus de soixante ans que parut pour la première fois cet ouvrage longtemps connu sous le nom de *Dictionnaire de médecine de Nysten* et devenu classique par un succès de onze éditions.

Les progrès incessants de la science rendaient nécessaires, pour cette treizième édition, une révision générale de l'ouvrage et plus d'unité dans l'ensemble des mots consacrés aux théories nouvelles et aux faits nouveaux que l'emploi du microscope, les progrès de l'anatomie générale, normale et pathologique, de la physiologie, de la pathologie, de l'art vétérinaire, etc., ont créés.

M. Littré, connu par sa vaste érudition et par son savoir étendu dans la littérature médicale, nationale et étrangère, et M. le professeur Ch. Robin, que de récents travaux ont placé si haut dans la science, se sont chargés de cette tâche importante. Une addition qui sera justement appréciée, c'est la Synonymie *grecque, latine, anglaise, allemande, italienne, espagnole*, qui, avec les glossaires, fait de ce Dictionnaire un Dictionnaire polyglotte.

DONNÉ. Hygiène des gens du monde, par Al. Donné, recteur de l'Académie de Montpellier. Paris, 1870. 1 vol. in-18 jésus de 540 pages. 4 fr.

Table des matières. — A mon éditeur. — Utilité de l'hygiène. — Hygiène des saisons. — Exercices et voyages de santé. — Eaux minérales. — Bains de mer. — Hydrothérapie. — La fièvre. — Hygiène des poumons. — Hygiène des dents. — Hygiène de l'estomac. — Hygiène des yeux. — Hygiène des femmes nerveuses. — La toilette et la mode. ***.

— **Conseils aux mères sur la manière d'élever les enfants nouveau-nés**. 5e *édition*. Paris, 1875. 1 vol. in-18 jésus de 350 p. . . . . 3 fr.

DUCHARTRE. Éléments de Botanique comprenant l'anatomie, l'organographie, la physiologie des plantes, les familles naturelles et la géographie botanique, par P. Duchartre, de l'Institut (Académie des sciences), professeur à la Faculté des sciences. *Deuxième édition*. 1876. 1 vol. in-8 de 1010 pages, avec 506 figures. Cart. . . . . 18 fr.

DUCHENNE. De l'Électrisation localisée et de son application à la pathologie et à la thérapeutique; par le docteur Duchenne (de Boulogne), lauréat de l'Institut de France. *Troisième édition*, entièrement refondue, Paris, 1872. 1 vol. in-8 avec 279 fig. et 3 pl. noires et coloriées.

— **Album de Photographies pathologiques**, complémentaire du livre ci-dessus. Paris, 1862. In-4 de 17 photographies, avec 20 pages de texte descriptif explicatif, cartonné. . . . . 25 fr.

— **Physiologie des mouvements**, démontrée à l'aide de l'expérimentation électrique et de l'observation clinique, et applicable à l'étude des paralysies et des déformations. Paris, 1867. In-8, XVI, 872 pag. avec 101 fig. 14 fr.

DUMÉRIL (A. M. C.). Entomologie analytique. Histoire générale, classification naturelle et méthodique des insectes, à l'aide de tableaux synoptiques. Paris, 1860. 2 vol. in 4, avec environ 500 figures. . . 25 fr.

DUTROULAU. Traité des maladies des Européens dans les pays chauds (régions intertropicales), climatologie et maladies communes, maladies endémiques, par le docteur A. F. DUTROULAU, médecin en chef de la marine. *Deuxième édition*. Paris, 1868. In-8, 650 pages.. . 8 fr.

DUVAL. Cours de physiologie. Voyez KUSS, page 21.

— **Structure et usage de la rétine**. Paris, 1872. 1 vol. in-8 de 142 pages avec figures.. . . . . 5 fr.

ÉCOLE DE SALERNE (L'). Traduction en vers français, par CH. MEAUX SAINT-MARC, avec le texte latin en regard (1870 vers), précédée d'une introduction par M. le docteur CH. DAREMBERG. — **De la Sobriété**, conseils pour vivre longtemps, par L. CORNARO, traduction nouvelle. Paris, 1861. 1 joli vol. in-18 jésus de LXXII-344 pages avec 5 vignettes. . . 3 fr. 50

ESPANET (Alexis). La pratique de l'homœopathie simplifiée, par le docteur ALEXIS ESPANET. Paris, 1874. 1 vol. in-18 jésus de XXI-346 pages. Cartonné.. . . . . 4 fr. 50

— **Traité méthodique et pratique de Matière médicale et de Thérapeutique**, basé sur la loi des semblables. Paris, 1861. In-8 de 808 pages. . . . . 9 fr.

FAGET (J.-C.). Monographie sur le type et la spécificité de la fièvre jaune établie avec l'aide de la montre et du thermomètre, par le docteur J.-C. FAGET, de la Faculté de Paris, etc. Paris, 1875. Grand in-8 de 60-24 pages, avec 109 tracés graphiques (pouls et température).. 4 fr.

FALRET. Des maladies mentales et des asiles d'aliénés, par J. P. FALRET, médecin de la Salpêtrière. Paris, 1864. In-8, LXX-800 pages avec 1 planche. . . . . 11 fr.

FAU (J.). Anatomie artistique élémentaire du corps humain. Paris, 1865. 1 vol. in-8, 17 pl. gravées, avec texte explicatif, figures noires. . 4 fr.

— LE MÊME, figures coloriées. . . . . 10 fr.

FELTZ. Traité clinique et expérimental des embolies capillaires, par V. FELTZ, professeur à la Faculté de médecine de Nancy. *Deuxième édition*. Paris, 1870. In-8 de 450 pages, avec 11 planches chromolithographiées, comprenant 90 dessins. . . . . 12 fr.

FERRAND (E.). Aide-mémoire de pharmacie, vade-mecum du pharmacien à l'officine et au laboratoire, par E. FERRAND, pharmacien à Paris. Paris, 1872. 1 vol. in-18 jésus, de 700 p. avec 250 figures; cart. . . . . 6 fr.

FERRAND (A.). Traité de thérapeutique médicale, ou guide pour l'application des principaux modes de médication thérapeutique et au traitement des maladies, par le docteur A. FERRAND, médecin des hôpitaux. Paris, 1875. 1 vol. in-18 jésus de 800 pages, Cart. . . . . 8 fr.

FEUCHTERSLEBEN. Hygiène de l'âme, traduit de l'allemand, par SCHLESINGER-RABIER. *Troisième édition*, précédée d'études biographiques et littéraires. Paris, 1870. 1 vol. in-18 de 260 pages. . . . . 2 fr. 50

FOISSAC. De l'influence des climats sur l'homme et des agents physiques sur le moral. Paris, 1867. 2 vol. in-8. . . . . 15 fr.

— **La longévité humaine**, ou l'art de conserver la santé et de prolonger la vie. Paris, 1873, 1 vol. grand in-8 de 567 pages. . . . . 7 fr. 50

FONSSAGRIVES. Hygiène et assainissement des villes; campagnes et villes; conditions originelles des villes; rues; quartiers; plantations; promenades; éclairage; cimetières; égouts; eaux publiques; atmosphère; population; salubrité; mortalité; institutions actuelles d'hygiène municipale; indications pour l'étude de l'hygiène des villes. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de XII-568 pages . . . . . 8 fr.

— **Thérapeutique de la phthisie pulmonaire** basée sur les indications, ou l'art de prolonger la vie des phthisiques par les ressources combinées de l'hygiène et des médicaments. Paris, 1866. 1 vol. in-8 de 588 pages. 7 fr.

— **Principes de thérapeutique générale** ou le médicament étudié aux points de vue physiologique, posologique et clinique, par J.-B. FONSSAGRIVES, prof. à la Faculté de médecine de Montpellier, 1875. 1 v. in-8 de 468 p. 7 fr.

— **Hygiène alimentaire** des malades, des convalescents et des valétudinaires, ou du Régime envisagé comme moyen thérapeutique. *Deuxième édition*, revue et corrigée. Paris, 1867. 1 vol in-8 de XXXII-670 p. 9 fr.

FOURNIER (H.). De l'Onanisme, causes, dangers et invénvénients pour les individus, la famille et la société, remèdes, par le docteur H. FOURNIER. Paris, 1875. 1 vol. in-12 de 175 pages. . . . . 1 fr. 50

FOVILLE (Ach.) Les aliénés aux États-Unis, législation et assistance, par ACH. FOVILLE fils, directeur-médecin de l'asile des aliénés de Quatre-Mares, près Rouen. Paris, 1873. In-8 de 118 pages . . . . 2 fr. 50

— **Les aliénés** Étude pratique sur la législation et l'assistance qui leur sont applicables. Paris, 1870. 1 vol in-8 de XIV-207 pages. . . . 3 fr.

FRERICHS. Traité pratique des maladies du foie et des voies biliaires, par FR. TH. FRERICHS, professeur à l'Université de Berlin, traduit de l'allemand par les docteurs DUMENIL et PELLAGOT. *Deuxième édition*. Paris, 1866. 1 vol. in-8 de XVI-896 pages avec 158 figures. . . 12 fr.

GALEZOWSKI (X.). Traité des maladies des yeux, par X. GALEZOWSKI, professeur à l'École pratique de la Faculté de Paris. Paris, 1874. *Deuxième édition*. Paris. 1875. 1 vol. in-8, XVI-896 p. avec 416 fig. 20 fr.

— **Du diagnostic des maladies des yeux** par la chromatoscopie rétinienne, précédé d'une étude sur les lois physiques et physiologiques des couleurs Paris, 1868. 1 v. in-8 de 267 p., avec 31 figures, une échelle chromatique comprenant 44 teintes et cinq échelles typographiques tirées en noir et en couleurs. . . . . 7 fr.

— **Échelles typographiques et chromatiques** pour l'examen de l'acuité visuelle. Paris, 1874. 1 vol. in-8 avec 20 pl. noires et col. Cart. 6 fr.

GALIEN. Œuvres anatomiques, physiologiques et médicales de Galien, traduites sur les textes imprimés et manuscrits; accompagnées de sommaires, de notes, de planches, par le docteur CH. DAREMBERG. Paris, 1854-1857. 2 vol. grand in-8 de 800 pages. . . . . 20 fr.
Séparément, le tome II. . . . . 10 fr.

Cette importante publication comprend : 1° Que le bon médecin est philosophe; 2° Exhortations à l'étude des arts; 3° Que les mœurs de l'âme sont la conséquence des tempéraments du corps; 4° Des habitudes; 5° De l'utilité des parties du corps humain; 6° Des facultés naturelles; 7° Du mouvement des muscles; 8° Des Sectes, aux étudiants; 9° De la meilleure secte, à Thrasybule; 10° Des lieux affectés; 11° De la Méthode thérapeutique, à Glaucon.

GALISSET et MIGNON. Nouveau traité des vices rédhibitoires ou **Jurisprudence vétérinaire**, contenant la législation et les garanties dans les ventes et échanges d'animaux domestiques, d'après les principes du code Napoléon et la loi modificatrice du 20 mai 1828, la procédure à suivre, la description des vices rédhibitoires, le formulaire des expertises, procès-verbaux et rapports judiciaires, et un précis des législations étrangères, par CH. M. GALISSET, ancien avocat au Conseil d'État et à la Cour de cassation, et J. MIGNON, ex-chef de service à l'Ecole vé-

térinaire d'Alfort, chirurgien de l'Hôtel-Dieu d'Orléans. *Troisième édition*, mise au courant de la jurisprudence et augmentée d'un appendice sur les épizooties et l'exercice de la médecine vétérinaire. Paris, 1864. In-18 jésus de 542 pages. . . . . 6 fr.

GALLARD. Leçons cliniques sur les maladies des femmes, par le docteur T. Gallard, médecin de l'hôpital de la Pitié. Paris, 1875. 1 vol. in-8 de xx-792 pages avec 94 figures. . . . . 12 fr.

GALLOIS. Formulaire de l'Union médicale. Douze cents formules favorites des médecins français et étrangers, par le docteur N. Gallois, lauréat de l'Institut. Paris, 1874. 1 vol. in-32 de xxvm-452 p. 2 fr. 50

GAUJOT et SPILLMANN (E.). Arsenal de la chirurgie contemporaine. Description, mode d'emploi et appréciation des appareils et instruments en usage pour le diagnostic et le traitement des maladies chirurgicales, l'orthopédie, la prothèse, les opérations simples, générales, spéciales et obstétricales, par G. Gaujot, professeur à l'Ecole du Val-de-Grâce, médecin principal de l'armée, et E. Spillmann, médecin-major, professeur agrégé à l'Ecole de médecine militaire (Val-de-Grâce). Paris, 1867-1872. 2 vol. in-8 avec 1855 figures. . . . . 32 fr.
Séparément : Tome II, 1 vol. in-8 de 1086 pages avec 1457 figures. *Pour les souscripteurs*. . . . . 18 fr.

GERBE. *Voy.* Brehm, Degland.

GERMAIN (de Saint-Pierre). **Nouveau Dictionnaire de botanique**, comprenant la description des familles naturelles, les propriétés médicales et les usages économiques des plantes, la morphologie et la biologie des végétaux (étude des organes et étude de la vie), par E. Germain (de Saint-Pierre), président de la Société botanique de France. Paris, 1870. 1 vol. in-8 de xvi-1388 pages avec 1640 fig . . . . . 25 fr.

GERVAIS et VAN BENEDEN. Zoologie médicale. Exposé méthodique du règne animal basé sur l'anatomie, l'embryogénie et la paléontologie, comprenant la description des espèces employées en médecine, de celles qui sont venimeuses et de celles qui sont parasites de l'homme et des animaux, par Paul Gervais, professeur au Muséum d'histoire naturelle, et J. van Beneden, professeur de l'Université de Louvain. Paris, 1859. 2 volumes in-8, avec 198 figures. . . . . 15 fr.

GILLET. Les champignons (fungi, hyménomycètes) qui croissent en France, description et iconographie, propriétés utiles ou vénéneuses, par C.-C. Gillet, vétérinaire principal en retraite, membre correspondant de la Société linnéenne de Normandie, 1re partie, 1875. 1 vol. in-8 de 150 pages, avec 52 planches coloriées . . . . . 22 fr. 50

GIRARD. Études pratiques sur les Maladies nerveuses et mentales, accompagnées de tableaux statistiques, par le docteur H. Girard de Cailleux, inspecteur général du service des aliénés de la Seine. Paris, 1865. 1 vol. grand in-8 de 234 pages. . . . . 12 fr.

GIRARD (M.). Les insectes, Traité élémentaire d'Entomologie, comprenant l'histoire des espèces utiles et leurs produits, des espèces nuisibles et des moyens de les détruire, l'étude des métamorphoses et des mœurs, les procédés de chasse et de conservation, par Maurice Girard, président de la Société entomologique de France. Introduction. — Coléoptères. Paris, 1873. 1 vol. in-8 de 840 pages, avec atlas de 60 planches coloriées . . . . . 60 fr.
Le même, fig. noires. . . . . 30 fr.
Sous presse : Le deuxième et dernier volume.

GLONER. Nouveau dictionnaire de thérapeutique comprenant l'exposé des diverses méthodes de traitement employées par les plus célèbres praticiens pour chaque maladie, par le docteur J.-C. Gloner. Paris, 1874. 1 vol. in-18 de vm-805 pages. . . . . 7 fr.

GODRON (D.-A.). **De l'espèce et des races dans les êtres organisés**, et spécialement de l'unité de l'espèce humaine. 2e *édition*. Paris. 1872, 2 vol. in-8. . . . . 12 fr.

GOFFRES. Précis iconographique de bandages, pansements et appareils, par le docteur Goffres, médecin principal des armées. Nouveau tirage. Paris, 1873. 1 vol. in-18 jésus, 596 pages avec 81 planches gravées. Figures noires cartonné. . . . . 18 fr.

— Le même, figures coloriées, cartonné. . . . . 36 fr.

GOSSELIN (L.). **Clinique chirurgicale de l'hôpital de la Charité**, par L. Gosselin, membre de l'Institut (Académie des sciences), professeur de clinique chirurgicale à la Faculté de médecine, chirurgien de la Charité. Paris, 1873. 2 vol. in-8, avec figures. . . . . 24 fr.

GOURRIER. Les lois de la génération, sexualité et conception, par le docteur H.-M. Gourrier. Paris, 1875. 1 vol. in-18 jésus de 200 p. 2 fr.

GRAEFE. Clinique ophthalmologique, par A. de Graefe, professeur à la Faculté de médecine de l'Université de Berlin. Edition française publiée avec le concours de l'auteur, par le docteur Ed. Meyer. Paris, 1866, in-8, avec 21 figures. . . . . 8 fr.

Table des matières. — Du traitement de la cataracte par l'extraction linéaire modifiée; leçon sur l'amblyopie et l'amaurose; de l'inflammation du nerf optique; de la névro-rétinite; sur l'embolie de l'artère centrale de la rétine comme cause de perte subite de la vision; de l'ophthalmie sympathique; observations ophthalmologiques chez les cholériques; notice sur le cysticerque.

GRELLOIS (E.). **Histoire médicale du blocus de Metz**, par E. Grellois, ex-médecin en chef des hôpitaux et ambulances de cette place. Paris. 1872. In-8 de 406 pages. . . . . 6 fr.

GRIESINGER. Traité des maladies infectieuses. Maladies des marais, fièvre jaune, maladies typhoïdes (fièvre pétéchiale ou typhus des armées, fièvre typhoïde, fièvre récurrente ou à rechutes, typhoïde bilieuse, peste), choléra, par W. Griesinger, professeur à la Faculté de médecine de l'Université de Berlin, traduit d'après la 2e édition allemande, et annoté par le docteur G. Lemattre, ancien interne des hôpitaux de Paris. Paris, 1868. in-8, VIII, 556 pages. . . . . 8 fr.

GRISOLLE. Traité de pneumonie, par A. Grisolle, professeur à la Faculté de médecine de Paris, médecin de l'Hôtel-Dieu, etc. *Deuxième édition*, refondue et augmentée. Paris, 1864, in-8, XVI-744 pages. . . 9 fr.

Ouvrage couronné par l'Académie des sciences et l'Académie de médecine (prix Itard).

GROS-FILLAY (P.). **Des indications et contre-indications dans le traitement des kystes de l'ovaire**, par le docteur P. Gros-Fillay. Paris, 1874. In-8 de 92 pages. . . . . 2 fr.

GUARDIA (J. M.). **La Médecine à travers les siècles.** Histoire et philosophie, par J. M Guardia, docteur en médecine et docteur ès lettres. Paris, 1865. 1 vol. in-8 de 800 pages. . . . . 10 fr.

Table des matières. — Histoire. La tradition médicale; la médecine grecque avant Hippocrate; la légende hippocratique; classification des écrits hippocratiques, documents pour servir à l'histoire de l'art. — Philosophie. Questions de philosophie médicale; évolution de la science; des systèmes philosophiques; nos philosophes naturalistes; sciences anthropologiques; Buffon; la philosophie positive et ses représentants; la métaphysique médicale; Asclépiade, fondateur du méthodisme; esquisse des progrès de la physiologie cérébrale; de l'enseignement de l'anatomie générale; méthode expérimentale de la physiologie; les vivisections à l'Académie de médecine; les misères des animaux; abus de la méthode expérimentale; philosophie sociale.

GUBLER. Commentaires thérapeutiques du Codex medicamentarius ou histoire de l'action physiologique et des effets thérapeutiques des médicaments inscrits dans la pharmacopée française, par Adolphe Gubler, professeur à la Faculté de médecine, médecin de l'hôpital Beaujon, membre de l'Académie de médecine. *Deuxième édition*, revue et augmentée. Paris, 1874. 1 vol. grand in-8, format du Codex, de 900 pages. Cartonné 15 fr.

GUIBOURT. Histoire naturelle des drogues simples ou Cours d'histoire naturelle professé à l'Ecole de pharmacie de Paris, par J. B. Guibourt, professeur à l'Ecole de pharmacie, membre de l'Académie de médecine. *Sixième édition*, corrigée et augmentée par G. Planchon, professeur à l'Ecole supérieure de pharmacie de Paris. Paris, 1869-70. 4 forts vol. in-8, avec 1024 figures. . . . . 36 fr.

GUILLAUME, Hygiène des écoles, conditions économiques et architecturales, par le docteur L. Guillaume. Paris, 1874. In-8 de 80 pages avec 25 figures. . . . . 2 fr.

GUNTHER. Nouveau manuel de médecine vétérinaire homœopathique ou traitement homœopathique des maladies du cheval, des bêtes bovines, des bêtes ovines, des chèvres, des porcs et des chiens, à l'usage des vétérinaires, des propriétaires ruraux, des fermiers, des officiers de cavalerie et de toutes les personnes chargées du soin des animaux domestiques, par F. A. Gunther, traduit de l'allemand sur la troisième édition, par P. J. Martin, médecin vétérinaire, ancien élève des écoles vétérinaires. 2e *édition*, revue et corrigée. Paris, 1871, 1 vol. in-18 de xn-504 pag. avec 54 figures. . . . . 5 fr.

GUYPN. Eléments de chirurgie clinique, comprenant le diagnostic chirurgical, les opérations en général, l'hygiène, le traitement des blessés et des opérés, par J. C. Félix Guyon, chirurgien de l'hôpital Necker, professeur agrégé de la Faculté de Paris. Paris, 1873. 1 vol. in-8 de xxxvm-672 pages, avec 63 figures. . . . . 12 fr.

GYOUV. Education de l'enfant au point devue physique et moral, depuis sa naissance jusqu'à sa première dentition. Paris, 1870. 1 vol. In-18 jésus de 300 pages. . . . . 3 fr.

HAHNEMBNN. Exposition de la doctrine médicale homœopathique, ou Organon de l'art de guérir, par S. Hahnemann; traduit de l'allemand, sur la dernière édition, par le docteur A. J. L. Jourdan. *Cinquième édition*, augmentée de commentaires et précédée d'une notice sur la vie, les travaux et la doctrine de l'auteur, par le docteur Léon Simon. Paris, 1873. 1 vol. in-8 de 640 pages avec le portrait de S. Hahnemann. . . . . 8 fr.

— **Études de médecine homœopathique.** Paris, 1855. 2 séries publiées chacune en 1 vol. in-8 de 600 pages. Prix du chacune. . . . . 7 fr.

HARRIS et AUSTEN, Traité théorique et pratique de l'art du dentiste, par Chapin. A. Harris et Ph. Austen, traduit de l'anglais et annoté par le docteur Elm. Andrieu. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de 976 pages avec 465 figures. Cartonné. . . . . 15 fr.

HERING. Médecine homœopathique domestique, par le Dr C. Hering. Traduction nouvelle, augmentée d'indications nombreuses et précédée de conseils d'hygiène et de thérapeutique générale, par le docteur Léon Simon. *Sixième édition*. Paris, 1873. In-12, xn-756 pages avec 169 figures, cart. . . . . 7 fr.

HIPPOCRATE. Œuvres complètes, traduction nouvelle, avec le texte en regard, collationné sur les manuscrits et toutes les éditions; accompagnée d'une introduction, de commentaires médicaux, de variantes et de notes philologiques; suivies d'une table des matières, par E. Littré.

membre de l'Institut de France. — Ouvrage complet. Paris, 1839-1861. 10 forts vol. in-8, de 700 p. chacun . . . . . 100 fr.
Il a été tiré quelques exemplaires sur jésus vélin. Prix de chaque volume . . . . . 20 fr.

HIRSCHEL. Guide du médecin homœopathe au lit du malade, pour le traitement de plus de mille maladies, et Répertoire de thérapeutique homœopathique, par le docteur B. Hirschel. Nouvelle traduction faite sur la 8e édition allemande, par le docteur V. Léon Simon. *Deuxième édition.* Paris, 1874. 1 vol. in-18 jésus de XXIV-540 pages. . . . . 5 fr.

HOFFMANN (Ach.). **L'homœopathie exposée aux gens du monde**, par le docteur Achille Hoffmann (de Paris). Paris, 1870, in-18 jésus de 142 pages. . . . . 1 fr. 25

HOLMES. Thérapeutique des maladies chirurgicales des enfants, par T. Holmes, chirurgien de l'hôpital des Enfants malades, chirurgien de Saint-George's Hospital, ouvrage traduit sur la seconde édition et annoté sous les yeux de l'auteur, par O. Larcher. Paris, 1870. 1 vol. in-8 de 917 pages avec 550 figures. . . . . 15 fr.

HUFELAND. L'art de prolonger la vie ou la Macrobiotique, par C.-W. Hufeland, nouvelle édition française, augmentée de notes par J. Pellagot. Paris, 1871. 1 vol. in-18 jésus de 640 pages. . . . . 4 fr.

HUGHES (R.). **Action des médicaments homœopathiques**, ou éléments de pharmaco-dynamique, traduit de l'anglais et annoté par le docteur I. Guérin-Méneville. Paris, 1874. 1 vol. in-18 jésus de XVI-647 p. 6 fr.

HUGUIER. Mémoire sur les allongements hypertrophiques du col de l'utérus, dans les affections désignées sous les noms de *descente*, de *précipitation de cet organe*, et sur leur traitement par la résection ou l'amputation de la totalité du col suivant la variété de cette maladie, par P. C. Huguier, membre de l'Académie de médecine, chirurgien de l'hôpital Beaujon. Paris, 1860, in-4, 251 pages, avec 13 planches lithographiées . . . . . 15 fr.

— **De l'hystérométrie** et du cathétérisme utérin, de leurs applications au diagnostic et au traitement des maladies de l'utérus et de ses annexes et de leur emploi en obstétrique. Paris, 1865, in-8 de 400 pages avec 4 planches lithographiées. . . . . 6 fr.

HURTREL-D'ARBOVAL. Dictionnaire de médecine, de chirurgie et d'hygiène vétérinaires, par L. H. J. Hurtrel-d'Arboval. Édition entièrement refondue et augmentée de l'exposé des faits nouveaux observés par les plus célèbres praticiens français et étrangers, par A. Zundel, vétérinaire supérieur d'Alsace-Lorraine. 3 vol. grand in-8 à 2 colonnes, avec 1500 figures, publiées en 6 parties. . . . . 50 fr.
En vente : Tome Ier (A-F), 1024 pages avec 410 figures. — Tome II (G-PA), 972 pages avec 704 figures. . . . . 40 fr.
Sous presse, tome III et dernier, pour les souscripteurs, ... 10 fr.
Après achèvement de l'ouvrage, le prix en sera porté à 60 fr.

HUXLEY. La place de l'homme dans la nature, par M. Th. Huxley, membre de la Société royale de Londres, traduit, annoté, précédé d'une introduction et suivi d'un compte rendu des travaux anthropologiques du Congrès international d'anthropologie et d'archéologie préhistoriques, tenu à Paris (session de 1867), par le docteur E. Dally, secrétaire général adjoint de la Société d'anthropologie, avec une préface de l'auteur. Paris, 1868, in-8 de 368 pages, avec 68 figures. . . . . 7 fr.

HUXLEY. Éléments d'anatomie comparée des animaux vertébrés. Traduit de l'anglais par Mme Brunet, revu par l'auteur et précédé d'une préface par Ch. Robin, membre de l'Institut (Académie des sciences). Paris, 1875. 1 vol. in-18 jésus de 600 pages, avec 122 figures. . . 6 fr.

IMBERT-GOURBEYRE. Des paralysies puerpérales. Paris, 1861. 1 vol. in-4 de 80 pages. . . . . 2 fr. 50

JAHR. Nouveau Manuel de Médecine homœopathique, divisé en deux parties : 1° Manuel de matière médicale, ou Résumé des principaux effets des médicaments homœopathiques, avec indication des observations cliniques; 2° Répertoire thérapeutique et symptomatologique, ou table alphabétique des principaux symptômes des médicaments homœopathiques avec des avis cliniques, par le docteur G. H. G. Jahr. *Huitième édition,* revue et augmentée. Paris, 1872. 4 vol. in-18 jésus. . . . . 18 fr.

— **Principes et règles qui doivent guider dans la pratique de l'Homœopathie.** Exposition raisonnée des points essentiels de la doctrine médicale de Hahnemann. Paris, 1857. In-8 de 528 pages.. . . . . 7 fr.

— **Notions élémentaires d'Homœopathie.** Manière de la pratiquer avec les effets les plus importants de dix des principaux remèdes homœopathiques, à l'usage de tous les hommes de bonne foi qui veulent se convaincre par des essais de la vérité de cette doctrine; par G. H. G. Jahr. *Quatrième édition,* corrigée et augmentée. Paris, 1861. In-18 de 144 p.. . . 1 fr. 25

— **Du Traitement homœopathique des Maladies des femmes,** par le docteur G. H. G. Jahr Paris, 1856. 1 vol. in-12, VII-496 pages. 6 fr.

— **Du Traitement homœopathique des Affections nerveuses** et des maladies mentales. Paris, 1854. 1 vol. in-12 de 600 pages. . . . . 6 fr.

— **Du Traitement homœopathique des Maladies des Organes de la Digestion,** comprenant un précis d'hygiène générale et suivi d'un répertoire diététique à l'usage de tous ceux qui veulent suivre le régime rationnel de la méthode de Hahnemann. Paris, 1859. 1 vol. in-18 jésus de 520 pages. . . . . 6 fr.

JAHR et **CATELLAN. Nouvelle Pharmacopée homœopathique,** ou Histoire naturelle, Préparation et Posologie ou administration des doses des médicaments homœopathiques, par le docteur G. H. G. Jahr et Catellan frères, pharmaciens homœopathes. *Troisième édition,* revue et augmentée. Paris, 1862. In-18 jésus de 430 pages, avec 144 figures. . . . . 7 fr.

JAQUEMET (H.). Des Hôpitaux et des Hospices, des conditions que doivent présenter ces établissements au point de vue de l'hygiène et des intérêts des populations, par le docteur Hipp. Jaquemet. Paris, 1866. 1 vol. in-8 de 184 pages, avec figures. . . . . 3 fr. 50

— **De l'entraînement chez l'homme au point de vue physiologique, prophylactique et curatif.** Paris, 1868. 1 vol. in-8 de 120 pages. 2 fr. 50

JEANNEL. Formulaire magistral, et officinal international, comprenant environ 4,000 formules tirées des Pharmacopées légales de la France et de l'étranger ou empruntées à la pratique des thérapeutistes et des pharmacologistes, avec les indications thérapeutiques, les doses des substances simples et composées, le mode d'administration, l'emploi des médicaments nouveaux, etc., suivi d'un mémorial thérapeutique, par J. Jeannel, pharmacien-inspecteur, membre du Conseil de santé des armées. Paris, 1870. 1 vol. in-8 de 1,000 pages cartonné. . . . 6 fr.

JEANNEL. De la prostitution dans les grandes villes, au dix-neuvième siècle, et de l'extinction des maladies vénériennes; questions générales d'hygiène, de moralité publique et de légalité, mesures prophylactiques internationales, réformes à opérer dans le service sanitaire; discussion des règlements exécutés dans les principales villes de l'Europe. Ouvrage précédé de documents relatifs à la prostitution dans l'Antiquité. *Deuxième édition,* refondue et complétée par des documents nouveaux. Paris, 1874. 1 vol. in-18 jésus de 650 pages avec figures. . . . . 5 fr.

JOBERT. De la réunion en chirurgie, par Jobert (de Lamballe), chirurgien de l'Hôtel-Dieu, professeur de clinique chirurgicale à la Faculté de médecine de Paris, membre de l'Institut. Paris, 1864. 1 volume in-8, xvi-720 pages, avec 7 planches dessinées d'après nature, gravées en taille-douce et coloriées. . . . . 12 fr.

JOUSSET (P.). Éléments de pathologie et de thérapeutique générales, par le docteur P. Jousset, médecin de l'hôpital Saint-Jacques, à Paris. Paris, 1875. 1 vol. in-8 de 243 pages. . . . . 4 fr.

JULLIEN. De la transfusion du sang, par le docteur Louis Jullien, prof. agrégé de la Faculté de médecine de Nancy, ancien interne des hôpitaux de Lyon. 1875. 1 vol. in-8 de 329 pages, avec figures. . . . . 5 fr.

KIENER (L.-C.). Species général et iconographie des coquilles vivantes, comprenant la collection du Muséum d'histoire naturelle de Paris, la collection Lamarck et les découvertes récentes des voyageurs, par L. C. Kiener, continuée par le Dr Fischer, aide-naturaliste au Muséum d'histoire naturelle. Paris, 1837-1876. Livr. 1 à 146. Prix de chacune, de 6 pl. col. et 24 pag. de texte, grand in-8 fig. col. 6 fr. — In-4, fig. col. . 12 fr.

I. Famille des Enroulées (genres Porcelaine, 57 pl.; Ovule, 6 pl.; Tarière, 1 pl.; Ancillaire, 6 pl.; Cône, 111 pl.).

II. Famille des Columellaires (genres Mitre, 34 pl.; Volute, 52 pl.; Marginelle, 13 pl.).

III. Famille des Ailées (genres Rostellaire, 4 pl.; Ptérocère, 10 pl.; Strombe, 34 pl.).

IV. Famille des Canalifères, 1re partie (genres Cérite, 32 pl.; Pleurotome, 27 pl.; Fuseau, 31 pl.).

V. Famille des Canalifères, 2e partie (genres Pyrule, 15 pl.; Fasciolaire, 13 pl.; Turbinelle, 21 pl.; Cancellaire, 9 pl.).

VI. Famille des Canalifères, 3e partie (genres Rocher, 47 pl.; Triton, 18 pl.; Ranelle, 15 pl.).

VII. Famille des Purpurifères, 1re partie (genres Cassidaire, 2 pl.; Casque, 16 pl.; Tonne, 5 pl.; Harpe, 6 pl.; Pourpre, 46 pl.).

VIII. Famille des Purpurifères, 2e partie (genres Colombelle, 16 pl.; Buccin, 31 pl.; Éburne, 3 pl.; Struthiolaire, 2 pl.; Vis, 14 pl.).

IX. Famille des Turbinacées (genres Turritelle, 14 pl.; Scalaire, 7 pl.; Cadran, 4 pl.; Roulette, 3 pl.; Dauphinule, 4 pl.; Phasianelle, 5 pl.; Troque, 49 pl.; Turbo, 38 pl.).

X. Famille des Plicaces (genres Tornatelle, 1 pl.; Pyramidelle, 2 pl.);

XI. Famille des Myaires (genre Thracie, 2 pl.).

Les livraisons 139 et 140 contiennent le texte complet du genre TURBO rédigé par M. Fischer. 128 p. et 6 pl. nouv.

Les livraisons 141 à 146 contiennent le commencement du genre TROQUE par M. Fischer.

KUSS et DUVAL. Cours de physiologie, d'après l'enseignement du professeur Kuss, publié par le docteur Mathias Duval, professeur agrégé de la Faculté de médecine de Paris, professeur d'anatomie à l'Ecole des Beaux-Arts. *Deuxième édition*, complétée sur l'exposé des travaux les plus récents. Paris, 1875. 1 vol. in-18 jésus, viii-624 p., avec 152 figures, cartonné. . . . . 7 fr.

LA POMMERAIS. Cours d'Homœopathie, par le docteur Ed. Coupy de la Pommerais. Paris, 1863. In-8, 555 pages. . . . . 4 fr.

LAYET. Hygiène des professions et des industries, précédé d'une étude générale des moyens de prévenir et de combattre les effets nuisibles de tout travail professionnel, par le docteur Alexandre Layet, professeur agrégé à l'Ecole de médecine navale de Rochefort. Paris, 1875. 1 v. in-12 de xiv-560 pages. . . . . 5 fr.

LEBERT. Traité d'Anatomie pathologique générale et spéciale, ou Description et iconographie pathologique des affections morbides, tant liquides que solides, observées dans le corps humain; par le docteur H. Lebert, professeur de clinique médicale à l'Université de Breslau. *Ouvrage complet*. Paris, 1855-1861. 2 vol. in-fol. de texte et 2 vol. in-fol. comprenant 200 planches dessinées d'après nature, gravées et coloriées. 615 fr.

Le tome Ier, comprend : texte, 760 pages, et tome Ier, planches 1 à 94 (livraisons I à XX).

Le tome II comprend : texte, 734 pages, et le tome II, planches 95 à 200 (livraisons XXI à XLI).

On peut toujours souscrire en retirant régulièrement plusieurs livraisons. Chaque livraison est composée de 30 à 40 p. de texte, sur beau papier vélin, et de 5 pl. in-folio gravées et coloriées. Prix de la livraison. 15 fr.

Cet ouvrage est le fruit de plus de douze années d'observations dans les nombreux hôpitaux de Paris. Aidé du bienveillant concours des médecins et des chirurgiens de ces établissements, trouvant aussi des matériaux précieux et une source féconde dans les communications et les discussions des Sociétés anatomiques, de biologie, de chirurgie et médicale d'observation, M. Lebert réunissait tous les éléments pour entreprendre un travail aussi considérable. Placé depuis à la tête du service médical d'un grand hôpital à Breslau, dans les salles duquel il a constamment cent malades, l'auteur continua à recueillir des faits pour cet ouvrage, vérifiant et contrôlant les résultats de son observation dans les hôpitaux de Paris par celle des faits nouveaux à mesure qu'ils se produisaient sous ses yeux.

Après l'examen des plantes de M. Lebert, un des professeurs les plus compétents et les plus illustres de la Faculté de Paris, écrivait : « J'ai admiré l'exactitude, la beauté, la nouveauté des planches qui composent la majeure partie de cet ouvrage : j'ai été frappé de l'immensité des recherches originales et toutes propres à l'auteur qu'il a dû exiger. *Cet ouvrage n'a pas d'analogue en France ni dans aucun pays.* »

LEFORT (Jules). Traité de chimie hydrologique comprenant des notions générales d'hydrologie et l'analyse chimique des eaux douces et des eaux minérales, par J. Lefort, membre de l'académie de médecine. 2e *édition* Paris, 1875. 1 vol. in-8, 798 pages avec 50 figures et une planche chromolithographiée. . . . . 12 fr.

LEGOUEST. Traité de Chirurgie d'armée, par L. Legouest, médecin-inspecteur de l'armée, ex-professeur de clinique chirurgicale à l'Ecole d'application de la médecine et de la pharmacie militaires. (Val-de-Grâce.) *Deuxième édition*. Paris, 1872. 1 fort vol. in-8 de 800 p. avec 149 fig. . . . . 14 fr.

Ce livre est le résultat d'une expérience acquise par une pratique de trente ans dans l'armée et par quinze années de campagnes en Afrique, en Orient, en Italie et en France. Il se termine par de nombreux documents sur le mode de fonctionnement du service de santé en campagne, sur le service dont il dispose en personnel, en moyens chirurgicaux, en matériel, en moyens de transport pour les blessés.

LETIEVANT. Traité des sections nerveuses, physiologie pathologique, indications, procédés opératoires, par le docteur Letievant, chirurgien des hôpitaux de Lyon. Paris, 1873. 1 vol. in-8 avec 20 figures . . . 8 fr.

LEUDET. Clinique médicale de l'Hôtel-Dieu de Rouen, par le docteur E. Leudet, médecin en chef de l'Hôtel-Dieu de Rouen. 1874. 1 vol. in-8 de 650 pages. . . . . 8 fr.

LEURET et GRATIOLET. Anatomie comparée du système nerveux considérée dans ses rapports avec l'intelligence ; par Fr. Leuret, médecin de l'hospice de Bicêtre, et P. Gratiolet, aide-naturaliste au Muséum d'histoire naturelle, professeur à la Faculté des sciences de Paris. Paris, 1839-1857. *Ouvrage complet*. 2 vol. in-8 et atlas de 32 planches in-folio dessinées d'après nature et gravées avec le plus grand soin. Figures noires. . . . . 48 fr.

Le même, figures coloriées. . . . . 96 fr.

Tome I, par LEURET, comprend la description de l'encéphale et de la moelle rachidienne, le volume, le poids, la structure de ces organes chez l'homme et les animaux vertébrés, l'histoire du système ganglionnaire des animaux articulés et des mollusques, et l'exposé de la relation qui existe entre la perfection progressive de ces centres nerveux et l'état des facultés instinctives, intellectuelles et morales.

Tome II, par GRATIOLET, comprend l'anatomie du cerveau de l'homme et des singes, des recherches nouvelles sur le développement du crâne et du cerveau, et une analyse comparée des fonctions de l'intelligence humaine.

Séparément le tome II. Paris, 1857. In-8 de 692 pages, avec atlas de 16 planches dessinées d'après nature, gravées. Figures noires. . . 24 fr.
Figures coloriées. . . . . 48 fr.

LÉVY. Traité d'Hygiène publique et privée, par le docteur MICHEL LÉVY, directeur de l'Ecole de médecine et de pharmacie militaires du Val-de-Grâce, membre de l'Académie de médecine. *Cinquième édition*, revue, corrigée et augmentée. Paris, 1869. 2 vol. in-8. Ensemble, 1900 p. 20 fr.

LORAIN. De l'Albuminurie, par PAUL LORAIN, professeur à la Faculté de médecine, médecin de l'hôpital de la Pitié. Paris, 1860. In-8, avec une planche. . . . . 2 fr. 50

— **Études de médecine clinique et physiologique.** *Le Choléra observé à l'hôpital Saint-Antoine*. Paris, 1868. 1 vol. grand in-8 raisin de 300 pages avec planches graphiques, dont plusieurs coloriées. . . . . 7 fr.

— *Le Pouls, ses variations et ses formes diverses dans les maladies*. Paris, 1870. 1 vol. gr. in-8, 372 pages avec 488 fig. . . . . 10 fr.

— Voy. VALLEIX, *Guide du Médecin praticien*.

LUTON. Traité des injections sous-cutanées à effet local. Méthode de traitement applicable aux névralgies, aux points douloureux, au goître, aux tumeurs, etc. par le docteur A. LUTON, professeur de pathologie externe à l'École de médecine de Reims, médecin de l'Hôtel-Dieu de cette ville. Paris, 1875, 1 vol in-8 de VIII-580 pages. . . . . 6 fr.

LUYS (J.-B.). **Recherches sur le système nerveux cérébro-spinal, sa structure, ses fonctions et ses maladies**, par J. B. LUYS, médecin de l'hôpital de la Salpêtrière, lauréat de l'Académie de médecine et de l'Institut. Paris, 1865. 1 vol. grand in-8 de 660 pages avec atlas de 40 pl. lithographiés et texte explicatif. Fig. noires. . . . . 35 fr.
LE MÊME, figures coloriées. . . . . 70 fr.

— **Iconographie photographique des centres nerveux.** Paris, 1873. 1 vol. gr. in-4° de texte et d'explication des planches VIII-74, 40 p. avec atlas de 70 photographies et 65 schémas lithographiés, cart. en 2 vol. 150 fr.

— **Des Maladies héréditaires**. Paris, 1865. In-8 de 140 pages. 2 fr. 50

— **Études de physiologie et de pathologie cérébrales**. Des actions réflexes du cerveau dans les conditions normales et morbides de leurs manifestations. Paris, 1874. 1 vol. grand in-18 de XII-200 pages, avec 2 planches contenant 8 figures tirées en lithographie et 2 figures tirées en photoglyptie. . . . . 5 fr.

LYELL. L'Ancienneté de l'homme, prouvée par la géologie, et remarques sur les théories relatives à l'origine des espèces par variation, par sir CHARLES LYELL, membre de la Société royale de Londres, traduit avec le consentement et le concours de l'auteur par M. CHAPER. *Deuxième édition* française revue et corrigée par HAMY. Paris, 1870. In-8 de XVI, 560 pag. avec 68 figures. — **Précis de Paléontologie humaine**, par HAMY, servant de supplément. Paris, 1870. 1 vol. in-8, avec figures. 16 fr.

— *Séparément*, **Précis de Paléontologie humaine**, par HAMY. Paris, 1870. 1 vol. in-8 avec fig. . . . . 7 fr.

MAGITOT (E.). **Traité de la carie dentaire.** Recherches expérimentales et thérapeutiques. Paris, 1867. 1 vol. in-8, 228 pages, avec 2 planches, 19 figures et 1 carte. . . . . 5 fr.

— **Mémoire sur les tumeurs du périoste dentaire** et sur l'ostéo-périostite alvéolo-dentaire *Deuxième édition*. Paris, 1875. In-8, avec 1 planche. . . . . 3 fr.

MAGNE. Hygiène de la vue, par le docteur A. Magne. *Quatrième édition*, revue et augmentée. Paris. 1866, in-18 jés. de 550 p. avec 30 fig. 3 fr.

MAHÉ. Manuel pratique d'hygiène navale, ou des moyens de conserver la santé des gens de mer, à l'usage des officiers mariniers et marins des équipages de la flotte, par le docteur J. Mahé, médecin-professeur de la marine. Ouvrage publié sous les auspices du ministre de la marine et des colonies. Paris, 1874. 1 vol. in-18 de xv-451 pages. Cartonné. 3 fr. 50

MAILLIOT. Traité pratique d'auscultation appliquée au diagnostic des maladies des organes respiratoires, par le docteur L. Mailliot. Paris, 1874. 1 vol. grand in-8 de 542 pages. . . . . 12 fr.

MANDL (L.). **Traité pratique des maladies du larynx et du pharynx.** Paris, 1872. In-8° de xx-816 pages, avec 7 planches gravées et coloriées et 164 figures, cartonné. . . . . 18 fr.

— **Anatomie microscopique**, par le docteur L. Mandl, professeur de microscopie. Paris, 1838-1857. Ouvrage complet. 2 vol. in-folio, avec 92 planches. . . . . 200 fr.

MARCÉ. Traité pratique des Maladies mentales, par le docteur L. V. Marcé, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, médecin des aliénés de Bicêtre. Paris. 1862. In-8 de 670 pages. . . . 8 fr.

— **Des Altérations de la sensibilité**, Paris, 1860. In-8. . . . 2 fr. 50

— **Recherches cliniques et anatomo-pathologiques sur la démence sénile** et sur les différences qui la séparent de la paralysie générale. Paris, 1861. Grand in-8, 72 pages. . . . . 1 fr. 50

— **De l'état mental de la chorée.** Paris, 1860. In-4, 38 pages. 1 fr. 50

MARCHAND (A.-H.). **Étude sur l'extirpation de l'extrémité inférieure du rectum**, par le docteur A.-H. Marchand, professeur agrégé de la Faculté de médecine de Paris. Paris, 1873. In-8 de 124 pages. 2 fr. 50

— **Des accidents qui peuvent compliquer la réduction des luxations traumatiques**. 1875, 1 vol. in-8 de 149 pages . . . . . 3 fr.

MARCHANT (Léon). **Étude sur les maladies épidémiques**, avec une réponse aux quelques réflexions sur le mémoire de l'angine épidémique. *Seconde édition*, corrigée et augmentée. Paris, 1861. In-12, 92 p. 1 fr.

MARTIN (Edouard). Etude clinique sur le traitement de quelques complications des rétrécissements de l'urèthre, rétrécissements infranchissables ou difficiles à franchir, compliqués d'infiltration urineuse, d'abcès urineux, de fistules urinaires, par M. le docteur Edouard Martin, ancien interne des hôpitaux de Paris. Paris, 1875. 1 vol. in-8 de 205 pages. . . . . 3 fr.

MARTINS. Du Spitzberg au Sahara. Étapes d'un naturaliste au Spitzberg, en Laponie, en Ecosse, en Suisse, en France, en Italie, en Orient, en Égypte et en Algérie par Charles Martins, professeur d'histoire naturelle à la Faculté de médecine de Montpellier, directeur du jardin des plantes de la même ville. Paris, 1866. In-8, xvi-620 pages. . . . . 8 fr.

MARVAUD (Angel). L'alcool, son action physiologique, son utilité et ses applications en hygiène et en thérapeutique. Paris, 1872. In-8, 100 pages avec 25 planches. . . . . 4 fr.

— **Les aliments d'épargne** : alcool et boissons aromatiques, café, thé, coca, cacao, maté, par le docteur Marvaud. 2e édition. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de 504 pages avec figures. . . . . 6 fr.

MAYER. Des Rapports conjugaux, considérés sous le triple point de vue de la population, de la santé et de la morale publique, par le docteur Alex. Mayer, médecin de l'inspection générale de la salubrité. *Sixième édition*, revue et augmentée. Paris, 1874. 1 volume in-18 jésus de 422 pages. . . . . 3 fr.

— **Conseils aux femmes sur l'âge de retour**, médecine et hygiène. Paris, 1875. 1 vol. in-12 de 256 pages. . . . . 3 fr.

MEHU. Voir *Annuaire pharmaceutique*, page 6.

MÉLIER. Relation de la fièvre jaune, survenue à Saint-Nazaire en 1861, lue à l'Académie de médecine en avril 1863, suivie d'une réponse aux discours prononcés dans le cours de la discussion et de la loi anglaise sur les quarantaines, par F. Mélier, inspecteur général des services sanitaires, membre de l'Académie de médecine et du Comité consultatif d'hygiène publique de France. Paris, 1863. In-4 de 276 pages avec 3 cartes. . . . . 10 fr.

MIARD (A.). Des troubles fonctionnels et organiques, de l'amétropie et de la myopie en particulier, de l'accommodation binoculaire et cutanée dans les vices de la réfraction, par le docteur Antony Miard, ancien chef de clinique ophthalmique. Paris, 1873. 1 vol. in-8 de VIII-460 pag. 7 fr.

MOITESSIER. La Photographie appliquée aux recherches microgra-phiques, par A. Moitessier, docteur ès sciences, professeur à la Faculté de médecine de Montpellier. Paris, 1866. 1 vol. in-18 jésus, avec 41 figures gravées d'après des photographies et 3 planches photographiques. . . . . 7 fr.

MOLÉ. Signes précis du début de la convalescence dans les maladies aiguës, par le docteur Léon Molé. Paris, 1870, grand in-8 de 112 pag. avec 23 figures. . . . . 3 fr.

MOLINARI (Ph. de). **Guide de l'homœopathiste**, indiquant les moyens de se traiter soi-même dans les maladies les plus communes en attendant la visite du médecin. *Seconde édition*. Bruxelles, 1861, in-18 de 256 pages. . . . . 5 fr.

MONOD. Étude sur l'angiome simple sous-cutané circonscrit, nævus vasculaire sous-cutané, angiome lipomateux, angiome lobulé, suivi de quelques remarques sur les angiomes circonscrits de l'orbite, par Ch. Monod professeur agrégé de la Faculté de médecine de Paris. Paris, 1873. In-8 de 86 pages avec 2 planches. . . . . 2 fr. 50

— **Étude comparative des diverses méthodes de l'Exérèse**. 1875. 1 vol. in-8 de 175 pages. . . . . 2 fr. 50.

MONTANÉ. Étude anatomique du crâne chez les microcéphales, par Louis Montané (de la Havane), docteur en médecine de la Faculté de Paris. Paris, 1874. Grand in-8 de 80 pages, avec 6 planches. . . . . 3 fr. 50

MOQUIN-TANDON. Histoire naturelle des Mollusques terrestres et fluviatiles de France, contenant des études générales sur leur anatomie et leur physiologie, et la description particulière des genres, des espèces, des variétés, par Moquin-Tandon, professeur d'histoire naturelle médicale à la Faculté de médecine de Paris, membre de l'Institut. Ouvrage complet. Paris, 1855. 2 vol. grand in-8 de 450 pages, avec un Atlas de 54 planches dessinées d'après nature et gravées. L'ouvrage complet, avec figures noires. . . . . 42 fr.

L'ouvrage complet avec figures coloriées. . . . . 66 fr.

Cartonnage de 3 vol. grand in-8. . . . . 4 fr. 50

Le tome Ier comprend les études sur l'anatomie et la physiologie des mollusques. — Le tome II comprend la description particulière des genres, des espèces et des variétés.

L'ouvrage de M. Moquin-Tandon est utile non-seulement aux savants, aux professeurs, mais encore aux collecteurs de coquilles, aux simples amateurs.

MOQUIN-TANDON. Éléments de Botanique médicale, contenant la description des végétaux utiles à la médecine et des espèces nuisibles à l'homme, vénéneuses ou parasites, précédée de Considérations sur l'organisation et la classification des végétaux. *Troisième édition*. Paris, 1875. 1 vol. in-18 jésus, avec 128 figures. . . . . 6 fr.

— **Éléments de Zoologie médicale**, contenant la description des animaux utiles à la médecine et des espèces nuisibles à l'homme, venimeuses ou parasites, précédée de Considérations sur l'organisation et la classification des animaux et d'un résumé sur l'histoire naturelle de l'homme. *Deuxième édition*, revue et augmentée. Paris, 1862. 1 volume in-18, avec 150 figures. . . . . 6 fr.

MORACHE. Traité d'hygiène militaire, par G. Morache, médecin-major de première classe, professeur agrégé à l'Ecole d'application de médecine et de pharmacie militaires (Val-de-Grâce). Paris, 1874. 1 vol. in-8 de 1050 pages avec 175 figures. . . . . 16 fr.

MORELL MACKENZIE. Du laryngoscope et de son emploi dans les maladies de la gorge, avec un appendice sur la rhinoscopie, traduit de l'anglais sur la deuxième édition par le docteur E. Nicolas-Duranty. Paris, 1867. Grand in-8, 156 pages avec figures. . . . . 4 fr.

MOTARD (A.). Traité d'hygiène générale, par le docteur Adolphe Motard. Paris, 1868. 2 vol. in-8, ensemble 1,900 pages, avec figures. 16 fr.

NAEGELÉ et GRENSER. Traité pratique de l'art des accouchements, par le professeur H. F. Naegelé, professeur à l'Université de Heidelberg et M. L. Grenser, directeur de la Maternité de Dresde. Traduit sur la 6e et dernière édition allemande, annoté et mis au courant des derniers progrès de la science, par G. A. Aubernas, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Nancy. Ouvrage précédé d'une introduction par J. A. Stoltz, doyen de la Faculté de médecine de Nancy. Paris, 1869. 1 vol. in-8 de 800 pages, avec une planche sur acier et 207 figures. . . . . 12 fr.

ORIARD (F.). L'homœopathie mise à la portée de tout le monde. *Troisième édition*. Paris, 1863, in-18 jésus, 570 pages. . . . . 4 fr.

ORIBASE. Œuvres, texte grec, en grande partie inédit, collationné sur les manuscrits, traduit pour la première fois en français, avec une introduction, des notes, des tables et des planches, par les docteurs Bussemaker et Daremberg. Paris, 1851-1873, tomes I à V, in-8 de 700 pages chacun. Prix de chaque volume. . . . . 12 fr.

— Sous presse, le tome VI et dernier.

OUDET. Recherches anatomiques, physiologiques et microscopiques sur les Dents et sur leurs maladies, comprenant : 1° Mémoire sur l'altération des dents désignée sous le nom de carie ; 2° sur l'odontogénie ; 3° sur les dents à couronnes ; 4° de l'accroissement continu des dents incisives chez les rongeurs, par le docteur J. E. Oudet, membre de l'Académie de médecine, etc. Paris, 1862. In-8, avec une pl. . . . . 4 fr.

PARENT-DUCHATELET. De la Prostitution dans la ville de Paris, considérée sous le rapport de l'hygiène publique, de la morale et de l'administration ; ouvrage appuyé de documents statistiques puisés dans les archives de la préfecture de police, par A. J. B. Parent-Duchatelet, membre du Conseil de salubrité de la ville de Paris. *Troisième édition*, com-

plétée par des documents nouveaux et des notes, par MM. A. Trébuchet et Poirat-Duval, chefs de bureau à la préfecture de police, suivie d'un précis hygiénique, statistique et administratif sur la prostitution dans les principales villes de l'Europe. Paris, 1857. 2 forts volumes in-8 de chacun 750 pages avec cartes et tableaux . . . . . 18 fr.

Le *Précis hygiénique, statistique et administratif sur la Prostitution dans les principales villes de l'Europe* comprend pour la France : Bordeaux, Brest, Lyon, Marseille, Nantes, Strasbourg, l'Algérie; pour l'Etranger : l'Angleterre et l'Ecosse, Berlin, Berne, Bruxelles, Christiania, Copenhague, l'Espagne, Hambourg, la Hollande, Rome, Turin.

PARISEL. *Voy.* Annuaire pharmaceutique, page 6.

PARSEVAL (LUD.). Observations pratiques de Samuel Hahnemann, et Classification de ses recherches sur les **Propriétés caractéristiques des médicaments**. Paris, 1857-1860. In-8 de 400 pages. . . . . 6 fr.

PAULET et LÉVEILLÉ. Iconographie des Champignons, de Paulet. Recueil de 217 planches dessinées d'après nature, gravées et coloriées, accompagné d'un texte nouveau présentant la description des espèces figurées, leur synonymie, l'indication de leurs propriétés utiles ou vénéneuses, l'époque et les lieux où elles croissent, par J. H. Léveillé. Paris, 1855. 1 vol. in-folio de 135 pages, avec 217 planches coloriées, cartonné. 170 fr.

Séparément le texte, par M. Léveillé, petit in-folio de 135 pages . . . . . 20 fr.

Séparément chacune des dernières planches in-folio coloriées. . 1 fr.

PEIN. Essai sur l'hygiène des champs de bataille, par le docteur Théodore Pein. Paris, 1875. In-8 de 80 pages. . . . . 2 fr.

PENARD. Guide pratique de l'Accoucheur et de la Sage-Femme, par le docteur Lucien Penard, chirurgien principal de la marine, professeur d'accouchements à l'Ecole de médecine de Rochefort. *Quatrième édition.* Paris, 1874. 1 vol. in-18, xxiv-550 pages, avec 142 fig. . . . . 4 fr.

PHARMACOPÉE FRANÇAISE. Voy. *Codex medicamentarius*, page 10.

PICTET. Traité de Paléontologie, ou Histoire naturelle des animaux fossiles considérés dans leurs rapports zoologiques et géologiques, par F. J. Pictet, professeur de zoologie et d'anatomie comparée à l'Académie de Genève, etc. *Deuxième édition*, corrigée et augmentée. Paris, 1853-1857. 4 volumes in-8, avec atlas de 110 planches grand in-4. . 80 fr.

PIESSE. Des odeurs, des parfums et des cosmétiques, histoire naturelle, composition chimique, préparation, recettes, industrie, effets physiologiques et hygiène des poudres, vinaigres, dentifrices, pommades, fards, savons, eaux aromatiques, essences, infusions, teintures, alcoolats, sachets, etc., par S. Piesse, chimiste parfumeur à Londres, édition française publiée avec le consentement et le concours de l'auteur, par O. Reveil. Paris, 1865. In-18 jésus de 527 pages, avec 86 figures. 7 fr.

PINARD. Les vices de conformation du bassin, étudiés au point de vue de la forme et des diamètres antéro-postérieurs. Recherches nouvelles de pelvimétrie et de pelvigraphie, par le docteur Ad. Pinard, ancien interne de la Maternité. Paris, 1874. In-4 de 64 pages, avec 100 planches représentant 100 bassins de grandeur naturelle. . . . . 7 fr.

— **Des contre-indications de la version dans la présentation de l'épaule** et des moyens qui peuvent remplacer cette opération. 1875. In-8 de 140 pages. . . . . 5 fr.

POINCARÉ. Leçons sur la physiologie normale et pathologique du système nerveux, par le docteur Poincaré, professeur adjoint à la Faculté de médecine de Nancy. Paris, 1873, 2 v. in-8 de 400 pages avec fig. 10 fr.

ROCHARD. Histoire de la chirurgie française au XIXe siècle, étude historique et critique sur les progrès faits en chirurgie et dans les sciences qui s'y rapportent, depuis la suppression de l'Académie royale de chirurgie jusqu'à l'époque actuelle, par le docteur Jules Rochard, directeur du service de santé de la marine. Paris, 1875. 1 vol. in-8 de XVI-800 pages. . . . . 14 fr.

ROUSSEL. Traité de la pellagre et des pseudo-pellagres, par le docteur J.-B.-Th. Roussel. Ouvrage couronné par l'Institut de France. Paris, 1866. 1 vol. in-8 de 656 pages. . . . . 10 fr.

ROUX. De l'ostéomyélite et des amputations secondaires, d'après les observations recueillies à l'hôpital de la marine de Saint-Mandrier (Toulon, 1859) sur les blessés de l'armée d'Italie, par M. le docteur Jules Roux, directeur du service de santé de la marine à Paris. Paris, 1860. 1 vol. in-4, avec 6 planches lithographiées. . . . . 5 fr.

SAINT-VINCENT. Nouvelle médecine des familles à la ville et à la campagne, à l'usage des familles, des maisons d'éducation, des écoles communales, des curés, des sœurs hospitalières, des dames de charité et de toutes les personnes bienfaisantes qui se dévouent au soulagement des malades : remèdes sous la main, premiers soins avant l'arrivée du médecin et du chirurgien, art de soigner les malades et les convalescents, par le docteur A. C. de Saint-Vincent. *Troisième édition.* Paris, 1874. 1 vol. in-18 jésus de 451 pages avec 142 figures. Cartonné. . 3 fr. 50

SAUREL. Traité de Chirurgie navale, par L. Saurel, chirurgien de la marine, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Montpellier, suivi d'un Résumé de leçons sur le **service chirurgical de la flotte**, par le docteur J. Rochard, directeur du service de santé de la marine à Brest Paris, 1861. In-8 de 600 pages, avec 106 figures. . . . . 8 fr.

SCHATZ. Études sur les hôpitaux sous tente, par le docteur J. Schatz, ex-chirurgien des armées des Etats-Unis d'Amérique. Paris, 1870. in-8 de 70 pages avec figures. . . . . 2 fr. 50

SCHIMPER. Traité de Paléontologie végétale, ou la flore du monde primitif dans ses rapports avec les formations géologiques et la flore du monde actuel, par W. P. Schimper, professeur de géologie à la Faculté des sciences et directeur du Musée d'histoire naturelle de Strasbourg. Paris, 1869-1874. 3 vol. grand in-8, avec atlas de 110 planches grand in-4, lithographiées. . . . . 150 fr.

Séparément, tome III. Paris, 1874. 1 vol. grand in-8 de 850 pages avec atlas de 20 planches. . . . . 50 fr.

SCHWABE. Pharmacopea homœopathica polyglottica, en allemand, anglais et français, par le docteur Wilhelm Schwabe et le docteur Alexandre Noack de Lyon. 1872. 1 vol. in-8 cart. de 250 pages. . . . . 9 fr.

SÉDILLOT. De l'évidement sous-périosté des os. *Deuxième édition.* Paris, 1867. 1 v. in-8. 438 pages, avec 16 pl. polychromiques. . 14 fr.

— **Contributions à la chirurgie.** Paris, 1869. 2 vol. gr. in-8 de 700 pages chacun, avec figures. . . . . 24 fr.

SÉDILLOT et LEGOUEST (L.). Traité de Médecine opératoire, bandages et appareils, par Ch. Sédillot, médecin inspecteur des armées, directeur de l'École du service de santé militaire, professeur de clinique chirurgicale à la Faculté de médecine de Strasbourg, membre correspondant de l'Institut de France et L. Legouest, médecin-inspecteur des armées, professeur à l'École du Val-de-Grâce. *Quatrième édition.* Paris, 1870. 2 vol. grand in-8 de 650 pages chacun, avec figures intercalées dans le texte et en partie coloriées. . . . . 20 fr.

SERRES (E.). Anatomie comparée transcendante. Principes d'embryogénie, de zoogénie et de tératogénie. Paris, 1859. 1 vol. in-4 de 942 pages, avec 26 planches . . . . . 16 fr.

SICHEL. Iconographie ophthalmologique, ou Description avec figures coloriées des maladies de l'organe de la vue, comprenant l'anatomie pathologique, la pathologie et la thérapeutique médico-chirurgicales, par le docteur J. Sichel, professeur d'ophthalmologie. Paris, 1852-1859. *Ouvrage complet*. 2 vol. grand in-4 dont 1 vol. de 840 pages de texte, et 1 volume de 80 planches dessinées d'après nature, gravées et coloriées avec le plus grand soin, accompagnées d'un texte descriptif. . . . . 172 fr. 50

Demi-reliure des deux volumes, dos de maroquin, tranche supérieure dorée. . . . . 15 fr.

Cet ouvrage est complet en 23 livraisons, dont 20 composées chacune de 28 pages de texte in-4 et de 4 planches dessinées d'après nature, gravées, imprimées en couleur, retouchées au pinceau, et 3 livraisons (17 bis, 18 bis et 20 bis de texte complémentaires). Prix de chaque livraison . . . . . 7 fr.

On peut se procurer séparément les dernières livraisons.

Le texte se compose d'une exposition théorique et pratique de la science, dans laquelle viennent se grouper les observations cliniques, mises en concordance entre elles, et dont l'ensemble formera un *Traité clinique des maladies de l'organe de la vue*, commenté et complété par une nombreuse série de figures.

Les planches sont aussi parfaites qu'il est possible; elles offrent une fidèle image de la nature; partout les formes, les dimensions, les teintes ont été consciencieusement observées; elles présentent la vérité pathologique dans ses nuances les plus fines, dans ses détails les plus minutieux; gravées par des artistes habiles, imprimées en couleur et souvent avec repère, c'est-à-dire avec une double planche, afin de mieux rendre les diverses variétés des injections vasculaires des membranes externes; toutes les planches sont retouchées au pinceau avec le plus grand soin.

L'auteur a voulu qu'avec cet ouvrage le médecin, comparant les figures et la description, puisse reconnaître et guérir la maladie représentée lorsqu'il la rencontrera dans la pratique.

SIEBOLD. Lettres obstétricales, par E. C. J. von Siebold, professeur d'accouchements à l'Université de Gœttingue, traduit de l'allemand par le docteur Morpain, avec introduction et des notes, par J. A. Stoltz, professeur d'accouchements à la Faculté de médecine de Strasbourg. Paris, 1866. In-18, 268 pages. . . . . 2 fr. 50

SIMON (LÉON). Des Maladies vénériennes et de leur traitement homœopathique, par le docteur Léon Simon fils. Paris, 1860. 1 vol. in-18 jésus, XII-744 pages. . . . . 6 fr.

— *Voy.* Hering.

SIMPSON. Clinique obstétricale et gynécologique, par sir James Y Simpson, professeur à l'Université d'Edimbourg. Traduit et annoté par G. Chantreuil, chef de clinique d'accouchements à la Faculté de médecine de Paris. 1874. 1 vol. grand in-8 de 820 p. avec fig. . . 12 fr.

SOUBEIRAN. Nouveau dictionnaire des falsifications et des altérations des aliments, des médicaments et de quelques produits employés dans les arts, l'industrie et l'économie domestique; exposé des moyens scientifiques et pratiques d'en reconnaître le degré de pureté, l'état de conservation, de constater les fraudes dont ils sont l'objet, par J. Léon Soubeiran, professeur à l'Ecole supérieure de pharmacie de Montpellier. Paris, 1874. 1 vol. grand in-8 de 640 pages avec 218 fig. Cart. . . . . 14 fr.

SYPHILIS VACCINALE (De la). Communications à l'Académie de médecine, par MM. Depaul, Ricord, Blot, Jules Guérin, Trousseau, Devergie, Briquet, Gibert, Bouvier, Bousquet, suivies de mémoires sur la transmission de la syphilis par vaccination animale, par MM. A. Viennois (de Lyon), Pellizari (de Florence), Palasciano (de Naples), Phillipeaux (de Lyon), et Auzias-Turenne. Paris, 1865, in-8 de 392 pages. . . . . 6 fr.

TARDIEU. Dictionnaire d'Hygiène publique et de Salubrité, ou Répertoire de toutes les Questions relatives à la santé publique, considérées dans leurs rapports avec les Subsistances, les Épidémies, les Professions, les Établissements et institutions d'Hygiène et de Salubrité, complété par le texte des Lois, Décrets, Arrêtés, Ordonnances et Instructions qui s'y rattachent ; par AMBROISE TARDIEU, professeur de médecine légale à la Faculté de médecine de Paris, médecin de l'Hôtel-Dieu, président du Comité consultatif d'hygiène publique. *Deuxième édition*, considérablement augmentée. Paris, 1862. 4 forts vol. grand in-8. (Ouvrage couronné par l'Institut de France.) . . . . . 32 fr.

TARDIEU (A). Étude médico-légale sur la folie. Paris, 1872. 1 vol. in-8 de XXII-610 pages avec 15 fac-simile d'écriture d'aliénésd. . 7 fr.

— **Étude médico-légale sur la pendaison, la strangulation et la suffocation.** Paris, 1870. 1 vol. in-8, XII, 3[illegible]2 pages avec planches . 5 fr.

— **Étude médico-légale et clinique sur l'empoisonnement** (avec la collaboration de M. Z. ROUSSIN, pour la partie de l'expertise médico-légale relative à la recherche chimique des poisons). *Deuxième édition*. Paris, 1875. 1 vol. in-8 de 1072 pages avec 2 planches et 52 figures. . 14 fr.

— **Étude médico-légale sur les Attentats aux mœurs.** *Sixième édition*. Paris, 1873. in-8 de 224 pages, 4 planches gravées. . . 4 fr 50

— **Étude médico-légale sur l'Avortement**, suivie d'une note sur l'obligation de déclarer à l'état civil les fœtus mort-nés et d'observations et recherches pour servir à l'histoire médico-légale des grossesses fausses et simulées. 3e *édition*. Paris, 1868. In-8, VIII-280 pages. . . . . 4 fr.

— **Étude médico-légale sur l'infanticide.** Paris, 1868. 1 vol. in-8, avec 3 planches coloriées. . . . . 6 fr.

— **Question médico-légale de l'identité** dans ses rapports avec les vices de conformation des organes sexuels, contenant les souvenirs et impressions d'un individu dont le sexe avait été méconnu. *Deuxième édition*. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de 176 pages. . . . . 3 fr.

— **Relation médico-légale de l'affaire Armand** (de Montpellier). Simulation de tentative homicide (commotion cérébrale et strangulation), avec les adhésions de MM. les professeurs G. TOURDES (de Strasbourg), CH. ROUGET (de Montpellier), ÉMILE GROMIER (de Lyon), SIRUS PIRONDI (de Marseille), et JACQUEMET (de Montpellier). Paris, 1864, in-8 de 80 pag. 2 fr.

— **Projet de construction du nouvel Hôtel-Dieu de Paris**, Paris 1865. In-8, 44 pages. . . . . 1 fr. 25

TARDIEU (A.) et LAUGIER. Contribution à l'histoire des monstruosités, considérée au point de vue de la médecine légale, à l'occasion de l'exhibition publique du monstre pygopage Millie-Christine, par MM. A. TARDIEU et M. LAUGIER. 1874. In-8 de 32 pages, avec 4 figures. 1 fr. 50

TEMMINCK et LAUGIER. Nouveau Recueil de planches coloriées d'Oiseaux, pour servir de suite et de complément aux planches enluminées de Buffon; par MM. TEMMINCK, directeur du Musée de Leyde, et MEIFFREN-LAUGIER, de Paris. Ouvrage complet en 102 livr. Paris, 1822-1838. 5 vol. grand in-folio, avec 600 planches dessinées d'après nature, par PRÊTRE et HUET, gravées et coloriées. . . . . 1,000 fr.

LE MÊME avec 600 planches grand in-4, figures coloriées. . . . 750 fr.

Demi-reliure, dos en maroquin, des 5 vol. grand in-fol. . . . 90 fr.

Dito des 5 vol. grand in-4. . . . . 60 fr.

Acquéreurs de cette grande et belle publication, l'une des plus importantes et l'un des ouvrages les plus parfaits pour l'étude de l'ornithologie, nous venons offrir le *Nouveau Recueil de planches coloriées d'oiseaux* en souscription en baissant le prix d'un tiers.

Chaque livraison, composée de 6 planches gravées et coloriées avec le plus grand soin, et le texte descriptif correspondant. L'ouvrage est *complet* en 102 livraisons.

Prix de la livraison in-folio, fig. coloriées, (15 fr.) . . . . . 10 fr.
— gr. in-4, fig. col., (10 fr. 50) . . . . . 7 fr. 50

La dernière livraison contient des tables scientifiques et méthodiques. Les personnes qui n'ont point retiré les dernières livraisons pourront se les procurer aux prix indiqués ci-dessus.

TESTE. Manuel pratique de Magnétisme animal. Exposition méthodique des procédés employés pour produire les phénomènes magnétiques et leur application à l'étude et au traitement des maladies. *Quatrième édition*, revue, corrigée et augmentée. Paris, 1853. In-12. . . . . 4 fr.

TESTE. Systématisation pratique de la Matière médicale homœopathique, par le docteur A. Teste, ancien président de la Société de médecine homœopathique. Paris, 1853. 1 vol in-8 de 616 pages. . 8 fr.

— **Traité homœopathique des maladies aiguës et chroniques des Enfants.** *Deuxième édition*. Paris, 1856. In-18 de 420 pages. . . 4 fr. 50

— **Comment on devient homœopathe.** *Troisième édition*, Paris, 1873. 1 vol. in-18 jésus de 322 pages. . . . . 3 fr. 50

THOMPSON. Traité pratique des maladies des voies urinaires, par sir Henry Thompson, professeur de clinique chirurgicale et chirurgien à University College Hospital, membre correspondant de la Société de chirurgie de Paris. Traduit avec l'autorisation de l'auteur et annoté par Ed. Martin, Ed. Labarraque et V. Campenon, internes des hôpitaux de Paris, membres de la Société anatomique, suivi des **Leçons cliniques sur les maladies des voies urinaires**, professées à University College Hospital, traduites et annotées par les docteurs Jude Hue et F. Gignoux. Paris, 1874. 1 vol. grand in-8 de 1020 pages, avec 280 figures. Cartonné. . . 20 fr.

TRIPIER (Aug.). **Manuel d'électrothérapie.** Exposé pratique et critique des applications médicales et chirurgicales de l'électricité. Paris, 1861. 1 vol. in-18 jésus, xii-624 pages, avec 89 figures. . . . . 6 fr.

TROUSSEAU. Clinique médicale de l'Hôtel-Dieu de Paris, par A. Trousseau, professeur à la Faculté de médecine de Paris, médecin de l'Hôtel-Dieu. *Quatrième édition*, par le docteur Michel Peter. Paris, 1873. 3 v. in-8, ensemble 2616 p., avec un portrait gravé de l'auteur. 32 fr.

Cette quatrième édition a reçu des augmentations considérables. Les sujets principaux que j'ai ajoutés à cette édition sont : les névralgies, la paralysie glosso-laryngée, l'aphasie, la rage, la cirrhose, l'ictère grave, le rhumatisme noueux, le rhumatisme cérébral, la chlorose, l'infection purulente, la phlébite utérine, la phlegmatia alba dolens, les phlegmons périhystériques, les phlegmons iliaques, les phlegmons périnéphriques, l'hématocèle rétro-utérine, l'ozène, etc., etc. (*Extrait de la préface de l'auteur.*)

TURCK. Méthode pratique de laryngoscopie, par le docteur Ludwig Turck, médecin en chef de l'hôpital général de Vienne (Autriche). Paris, 1861. In-8 de 80 p., avec une pl. lithographiée et 29 figures. 3 fr. 50

— **Recherches cliniques sur diverses maladies du larynx, de la trachée et du pharynx**, étudiées à l'aide du laryngoscope. Paris, 1862. In-8 de viii-100 pages. . . . . 2 fr. 50

VALETTE. Clinique chirurgicale de l'Hôtel-Dieu de Lyon, par A.-D. Valette, professeur de clinique chirurgicale à l'Ecole de médecine de Lyon, 1875, 1 vol. in-8 de 720 pages avec figures. . . . . 12 fr.

VALLEIX. Guide du Médecin praticien, ou Résumé général de Pathologie interne et de Thérapeutique appliquées, par le docteur F. L. I. Valleix, médecin de l'hôpital de la Pitié. *Cinquième édition*, entièrement refondue, et contenant le résumé des travaux les plus récents, par P. Lorain, médecin des hôpitaux de Paris, professeur agrégé de la Faculté

cine, avec le concours de médecins civils et de médecins appartenant à l'armée et à la marine. Paris, 1866. 5 volumes grand in-8 de chacun 800 pages, avec 411 figures. . . . . 50 fr.

Tome I. Fièvres, maladies pestilentielles, maladies constitutionnelles, névroses. — Tome II. Maladies des centres nerveux, maladies des voies respiratoires. — Tome III. Maladies des voies circulatoires, maladies des voies digestives. — Tome IV. Maladies des annexes des voies digestives, maladies des voies génito-urinaires. — Tome V. Maladies des femmes, maladies du tissu cellulaire, de l'appareil locomoteur, maladies de la peau, maladies des yeux et des oreilles. Intoxications par les venins, par les virus, par les poisons d'origine animale, végétale et minérale. Table générale.

VERLOT. Le Guide du Botaniste herborisant, conseils sur la récolte des plantes, la préparation des herbiers, l'exploration des stations de plantes phanérogames et cryptogames, et les herborisations aux environs de Paris, dans les Ardennes, la Bourgogne, la Provence, le Languedoc, les Pyrénées, les Alpes, l'Auvergne, les Vosges, au bord de la Manche, de l'Océan et de la Méditerranée, par M. Bernard Verlot, chef de l'Ecole de botanique au Muséum d'histoire naturelle, avec une Introduction par M. Naudin, membre de l'Institut (Académie des sciences). Paris, 1865. In-8, 600 pages avec figures intercalées dans le texte. Cart. 5 fr. 50

VERNEAU. Le bassin dans les sexes et dans les races, par le docteur R. Verneau, préparateur d'anthropologie au Muséum d'histoire naturelle. Paris, 1875. in-8 de 156 pages, avec 16 planches. . . . . 6 fr.

VERNEUIL. De la gravité des lésions traumatiques et des opérations chirurgicales chez les alcooliques, communications à l'Académie de médecine, par MM. Verneuil, Hardy, Gubler, Gosselin, Béhier, Richet, Chauffard et Giraldès. Paris, 1871, in-8 de 160 pages. . . . . 3 fr.

VERNOIS. Traité pratique d'Hygiène industrielle et administrative, comprenant l'étude des établissements insalubres, dangereux et incommodes; par le docteur Maxime Vernois, membre de l'Académie de médecine. Paris, 1860. 2 vol. in-8 de chacun 700 pages. . . . . 16 fr.

— **De la Main des ouvriers et des artisans** au point de vue de l'hygiène et de la médecine légale, Paris, 1862. In-8 avec 4 pl. chromolithographiées. . . . . 3 fr. 50

— **État hygiénique des lycées de l'empire en 1867**. Paris, 1868, in-8. . . . . 2 fr. 50

VIDAL. Traité de Pathologie externe et de Médecine opératoire, avec des Résumés d'anatomie des tissus et des régions, par A. Vidal (de Cassis), chirurgien de l'hôpital du Midi, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, etc. *Cinquième édition*, par le docteur Fano, professeur agrégé de la Faculté de médecine de Paris. Paris, 1861. 5 vol. in-8 avec 761 figures. . . . . 40 fr.

VILLEMIN. Études sur la tuberculose, preuves rationnelles et expérimentales de sa spécificité et de son inoculation, par J.-A. Villemin, professeur à l'École du Val-de-Grâce. Paris, 1868. 1 vol. in-8 de 640 pages. . . . . 8 fr.

VIRCHOW. La pathologie cellulaire basée sur l'étude physiologique et pathologique des tissus, par R. Virchow, professeur à la Faculté de Berlin, médecin de la Charité, membre correspondant de l'Institut. Traduction française. *Quatrième édition*, conforme à la quatrième édition allemande, par I. Sraus, chef de clinique de la Faculté de médecine. Paris, 1874. 1 vol. in-8 de xxiv-582 pages, avec 157 fig. . . . . 9 fr.

VOISIN (**Aug.**). **De l'Hématocèle rétro-utérine** et des Épanchements sanguins non nekystés de la cavité péritonéale du petit bassin, considérés comme accidents de la menstruation; par le docteur Auguste Voisin, médecin de la Salpêtrière. Paris, 1860. In-8 de 368 pages, avec une planche. . . . . 4 fr. 50

— **Le service des secours publics** à Paris et à l'étranger. Paris, 1873. In-8 de 54 pages. . . . . 1 fr. 50

WATELET (**A. D.**). **Description des plantes fossiles du bassin de Paris**. Paris, 1865-1866. 2 vol. in-4 de 300 pages et de 60 planches lithographiées, cartonnés. . . . . 60 fr.

WEHENKELL. **Éléments d'anatomie et de physiologie pathologiques générales**, nosologie, par le docteur Wehenkell, professeur à l'Ecole de médecine vétérinaire de Cureghem. 1874. 1 vol. in-8 de 320 p. 7 fr. 50

WETTERWALD (**Maurice.**) **Le vétérinaire du foyer** ou traité des diverses maladies de nos principaux animaux domestiques. Traduit de l'allemand par J. Ducommun. Paris, 1872. In-12 de xi-196 pages. . . . . 2 fr. 50

WOILLEZ. **Dictionnaire de diagnostic médical**, comprenant le diagnostic raisonné de chaque maladie, leurs signes, les méthodes d'exploration et l'étude du diagnostic par organe et par région, par E.-J. Woillez, médecin de l'hôpital La Riboisière. *Deuxième édition*. Paris, 1870. In-8 de 932 pages avec figures. . . . . 16 fr.

WUNDT. **Traité élémentaire de physique médicale**, par le docteur Wundt, professeur à l'Université de Heidelberg, traduit avec de nombreuses additions, par le docteur Ferd. Monoyer, professeur agrégé de physique médicale à la Faculté de médecine de Nancy. Paris, 1871, 1 vol. in-8 de 704 p. avec 356 fig. y compris 1 pl. en chromolith. 12 fr.

ZIMMERMANN. **Anthropologie et ethnographie. L'homme**, merveilles de la nature humaine, origine de l'homme, son développement de l'état sauvage à l'état de civilisation. Nouvelle édition. Paris, 1869. In-8 de 796 pages, avec figures et planches . . . . . 10 fr.

Le même, relié, doré sur tranches, plats toile. . . . . 13 fr.

Tous les ouvrages portés dans ce Catalogue seront expédiés par la poste franco, dans les départements et en Algérie, à toute personne qui en aura envoyé le montant en un mandat sur Paris ou en timbres-poste.

EN DISTRIBUTION

CATALOGUE GÉNÉRAL

DES LIVRES DE MÉDECINE

de Chirurgie, de Pharmacie, des Sciences accessoires et de l'Art vétérinaire, français et étrangers qui se trouvent chez J.-B. Baillière et Fils. Un vol. in-8 de xlviii-400 pages. . . . . 1 fr. 50

CATALOGUE GÉNÉRAL

DES LIVRES D'HISTOIRE NATURELLE

FRANÇAIS ET ÉTRANGERS QUI SE TROUVENT CHEZ J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

Histoire naturelle générale, 16 pages.
Géologie, Minéralogie, Paléontologie, 36 p. (Mai 1874).
Botanique, 80 pages. (Août 1872).
Zoologie, 104 pages. (1872)

Les Catalogues spéciaux seront envoyés *franco* à toute personne qui en fera la demande par lettre affranchie.

Nous publions tous les 2 mois une notice de nos nouvelles publications, et nous l'envoyons régulièrement à toute personne qui nous en fait la demande par lettre affranchie.

Pour paraître en 1876 :

MANIPULATIONS DE PHYSIQUE. Cours de travaux pratiques, professé à l'Ecole de pharmacie, par M. Bouquet, professeur à l'Ecole de pharmacie. 1 vol. in-8 de 700 pages, avec 250 figures.

TRAITÉ D'OPHTHALMOSCOPIE, par le docteur X. Galezowski, professeur à l'Ecole de médecine pratique. 1 vol. grand in-8, avec 50 figures et 12 planches en chromolithographie.

OPHTHALMOSCOPIE MÉDICALE, indiquant les lésions du nerf optique, de la rétine et de la choroïde, propres à éclairer le diagnostic des maladies du cerveau et de la moelle épinière, de la tuberculose, des maladies du cœur et de la mort, par M. le docteur Bouchut. 1 vol. in-4 composé de 14 planches chromolithographiées, comprenant 126 figures avec texte descriptif et explicatif.

LA VIE ET SES ATTRIBUTS, dans ses rapports avec la philosophie, l'histoire naturelle et la médecine, par M. le docteur Bouchut. Deuxième édition. 1 vol. in-18 jésus.

ÉLÉMENTS DE BOTANIQUE, comprenant l'anatomie, l'organographie, la physiologie des plantes, les familles naturelles et la géographie botanique, par P. Duchartre, de l'Institut (Académie des sciences), professeur à la Faculté des sciences. 2e édition, 1 vol. in-8 de 1010 pages, avec 5[illegible] fig. Cart.

TRAITÉ PRATIQUE DES MALADIES NERVEUSES, par Hasse, traduction française, augmentée de notes par M. Labadie Lagrave. 1 vol. grand in-8 de 600 pages, avec figures.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE ET PRATIQUE DES MALADIES MENTALES, par H. Dagonet, médecin en chef de l'Asile des aliénés de Sainte-Anne. 2e édition. 1 vol. in-8 de 800 pages, avec figures et carte.

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

or before the date last stamped below.

B21
G19
1874
Ganot, A.
Traité élémentaire
de physique. 16.éd.
7707
NAME
DATE DUE